

**Estudio experimental y numérico de la  
construcción de forjados hormigonados  
*in situ* mediante procesos de cimbrado,  
clareado y descimbrado de plantas  
consecutivas**

**YEZID ALEXANDER ALVARADO VARGAS**

EDITORIAL  
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería  
Civil



ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE LA  
CONSTRUCCIÓN DE FORJADOS HORMIGONADOS IN SITU  
MEDIANTE PROCESOS DE CIMBRADO, CLAREADO Y  
DESCIMBRADO DE PLANTAS CONSECUTIVAS

TESIS DOCTORAL

AUTOR:

Yezid A. Alvarado Vargas

DIRGIDA POR:

Dr. Pedro A. Calderón García

Dr. Juan Moragues Terrades

Valencia, Mayo de 2009

*Colección Tesis Doctorales*

© Yezid Alexander Alvarado Vargas

© 2014, de la presente edición: Editorial Universitat Politècnica de València

Telf.: 963 877 012 / [www.lalibreria.upv.es](http://www.lalibreria.upv.es)

ISBN: 978-84-9048-309-1 (versión impresa)

Queda prohibida la reproducción, distribución, comercialización, transformación, y en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de todo o parte de los contenidos de esta obra sin autorización expresa y por escrito de sus autores.

Yezid Alexander Alvarado Vargas  
ICITECH, Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería  
Civil Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46071 Valencia, España  
Tel.: +34 963877000 ext. 75619; fax: +34 963877568  
E-mail: [yealvar@upvnet.upv.es](mailto:yealvar@upvnet.upv.es)

*A mis padres, Yezid y Mireya*

*A mi hermana, Mónica*

*A mi Familia*



## AGRADECIMIENTOS

Resulta difícil imaginar la dificultad que representa escribir las sensaciones de gratitud que pasan por mi cabeza y corazón al pensar en cada una de las personas que intervinieron en esta gran aventura que ha englobado el desarrollo de esta Tesis Doctoral. Aun más difícil es cuando todas estas personas resultan siendo amigos que te brindan el apoyo necesario para recorrer el arduo pero satisfactorio camino que hoy me ha llevado a terminar este trabajo.

Quisiera empezar por agradecer a los directores de esta Tesis Doctoral quienes depositaron en mí la confianza para el desarrollo de esta investigación. Por una parte a Pedro Calderón, que además de guiarme en el desarrollo de este trabajo siempre ha sido un gran amigo con el que he podido contar a lo largo de estos años, en los que me ha enseñado a trabajar con rigurosidad, seriedad y humildad. A Juan José Moragues agradecer su gran interés por desarrollar esta investigación que desde hace varios años lleva siendo un importante objetivo en su pensamiento investigador.

Detrás de esta Tesis no sólo estamos él doctorando y los directores, también existe un grupo de investigación sin el cual hubiese sido imposible desarrollar este trabajo. Quiero agradecer a Nacho, Teresa, Fran, Benjamín y especialmente a Isabel, Vicente y Jose Miguel con quienes he compartido horas de trabajo con dificultades y alegrías que finalmente han dado como resultado este trabajo. También quiero agradecer a todos los compañeros de ICITECH y del Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil por su ayuda y disponibilidad durante estos años.

Mis más sinceras gracias a mi familia que a pesar de robarles todo el tiempo que llevo lejos de casa siempre me han brindado su incondicional apoyo. Especialmente quiero agradecer a mis padres Yezid y Mireya por sus enseñanzas y consejos que me han formado hasta el día de hoy, y a mi hermana Mónica por ser mi cómplice y mejor amiga sin importar la distancia.

A lo largo de estos años, al vivir en otro país, he tenido la suerte de conocer personas que se han convertido en un apoyo para los buenos y malos momentos que en la vida se te van presentando. Gracias amigos por compartir esta aventura Leo, Gersey, Andrés, Edu, Sam, Inma, Tefy, Feli, Gloria, Needy, Lucho, Benhur, Elkin, Yohanna, Erich, Paty, Chucho, Parra y Cesar†. A mi amigo Alberto Canet gracias por creer en mí y por todas tus enseñanzas. También quiero agradecer a Charlie, Oscar, Andrea y Conxi amigos con los que he compartido y comparto los momentos más especiales de mi vida y que siempre tendrán un lugar especial en mi corazón.

Finalmente agradezco al Ministerio de Ciencia y Tecnología por la financiación del proyecto, así como la participación de las empresas Encofrados J. ALSINA, COPASA y LAFARGE.

## RESUMEN

Cada año se construyen miles de metros cuadrados de estructura y forjados de edificios en España empleando sistemas y procesos que se basan en apoyar las estructuras auxiliares de apuntalamiento (cimbra) sobre forjados hormigonados recientemente. La mejora del plazo y economía del proceso constructivo, estriba en recuperar la mayor parte de las estructuras auxiliares en el menor tiempo posible. Con este objetivo se emplea en España una operación conocida como clareado o descimbrado parcial. La técnica consiste en la retirada del encofrado y de más del 50 % de los puntales que soportan el forjado pocos días después de su hormigonado.

Esta operación, a pesar de su extendido uso en España, ha sido poco estudiada hasta la fecha. Por lo tanto, actualmente existe la incertidumbre sobre el modo en que se transmiten las cargas entre forjados y puntales durante la construcción de la estructura. La presente Tesis Doctoral estudia el efecto que tiene el clareado sobre la transmisión de cargas entre forjados y puntales, durante el proceso constructivo de forjados sucesivos de hormigón in situ. Este estudio se enmarca dentro del proyecto de investigación “Estudio experimental y numérico de la construcción de forjados hormigonados in situ mediante sistemas de cimbrado y descimbrado”, financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia de España, proyecto BIA 2004-02085. Esta investigación se ha desarrollado en el Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la Universidad Politécnica de Valencia.

Para determinar la influencia que tiene el clareado sobre la transmisión de cargas entre forjados y puntales, se ha desarrollado un estudio experimental. En dicho estudio, se ha medido la distribución de cargas en los puntales durante la construcción de un edificio de tres plantas a escala real, estando todos los forjados formados por losas maciza de hormigón armado. A partir de las mediciones realizadas se ha demostrado que al realizar la operación de clareado, los forjados asumen una fracción importante de carga (en relación a su peso propio)

En otra fase de la investigación, se ha desarrollado un modelo de elementos finitos, con el objeto de simular el proceso constructivo seguido en el edificio analizado en el estudio experimental. El modelo de elementos finitos ha quedado calibrado al comparar los resultados experimentales y numéricos. Una vez el modelo ha sido calibrado, se han desarrollado nuevos modelos de elementos finitos con el objeto de comparar diferentes procesos constructivos de uso habitual con un proceso en el que se realiza la operación de clareado.

En la última parte de la tesis doctoral se ha comprobado el grado de ajuste de los diferentes métodos simplificados disponibles en la bibliografía. De este modo, se han llegado a proponer las diferentes ventajas e inconvenientes de cada método, en aquellos casos en que se pretenda estimar la transmisión de cargas entre forjados y puntales para el caso en que se emplee la operación del clareado.

**Palabras Clave:** Clareado; Cimbrado; Descimbrado; Puntal; Edificios de hormigón armado; Forjados; Estudio experimental; Método de los elementos finitos.

## RESUM

Cada any es construïxen milers de metres quadrats d'estructura i forjats d'edificis a Espanya emprant sistemes i processos que es basen a recolzar les estructures auxiliars d'apuntament (cimbra) sobre forjats hormigonados recentment. La millora del termini i economia del procés constructiu, consistix a recuperar la major part de les estructures auxiliars en el menor temps possible. Amb este objectiu s'empra a Espanya una operació coneguda com clarejat o descintrat parcial. La tècnica consistix en la retirada de l'encofrat i de més del 50 % dels puntals que suporten el forjat pocs dies després del seu hormigonado.

Esta operació, a pesar del seu estés ús a Espanya, ha sigut poc estudiada fins a la data. Per tant, actualment hi ha la incertesa sobre el mode en què es transmeten les càrregues entre forjats i puntals durant la construcció de l'estructura. La present Tesi Doctoral estudia l'efecte que té el clarejat sobre la transmissió de càrregues entre forjats i puntals, durant el procés constructiu de forjats successius de formigó in situ. Este estudi s'emmarca dins del projecte d'investigació “Estudi experimental i numèric de la construcció de forjats hormigonados in situ per mitjà de sistemes de reverència i descintrat”, finançat pel Ministeri d'Educació i Ciència d'Espanya, projecte BIA 2004-02085. Esta investigació s'ha desenrotllat en l'Institut de Ciència i Tecnologia del Formigó (ICITECH) de la Universitat Politècnica de València.

Per a determinar la influència que té el clarejat sobre la transmissió de càrregues entre forjats i puntals, s'ha desenrotllat un estudi experimental. En el dit estudi, s'ha mesurat la distribució de càrregues en els puntals durant la construcció d'un edifici de tres plantes a escala real, estant tots els forjats formats per lloses massissa de formigó armat. A partir dels mesuraments realitzats s'ha demostrat que al realitzar l'operació de clarejat, els forjats assumeixen una fracció important de càrrega (en relació al seu pes propi)

En una altra fase de la investigació, s'ha desenrotllat un model d'elements finits, amb l'objecte de simular el procés constructiu seguit en l'edifici analitzat en l'estudi experimental. El model d'elements finits ha quedat calibrat al comparar els resultats experimentals i numèrics. Una vegada el model ha sigut calibrat, s'han desenrotllat nous models d'elements finits amb l'objecte de comparar diferents processos constructius d'ús habitual amb un procés en què es realitza l'operació de clarejat.

En l'última part de la tesi doctoral s'ha comprovat el grau d'ajust dels diferents mètodes simplificats disponibles en la bibliografia. D'esta manera, s'han arribat a proposar els diferents avantatges i inconvenients de cada mètode, en aquells casos en què es pretenga estimar la transmissió de càrregues entre forjats i puntals per al cas en què s'empra l'operació del clarejat.

**Paraules Clau:** Clarejat; Reverència; Descintrat; Puntal; Edificis de formigó armat; Forjats; Estudi experimental; Mètode dels elements finits.

## SUMMARY

Every year sees the construction thousands of square metres of building structures and slabs using successive levels of shoring. This system is based on resting the auxiliary shoring structures on recently poured slabs. The savings in time and cost of these construction systems stem mainly from the possibility of recovering most of the components used in the shortest possible time. In Spain, with this objective in mind, a method known as clearing (or partial striking) is used. The technique consists of removing the formwork and 50% of the shores which hold up the slab, a few days after the pouring of concrete.

Clearing is very used in Spain; however, it has been very little studied to date. Therefore, there is now uncertainty about the manner in which loads are transmitted between slabs and shores during the construction of the structure. This PhD thesis studies the transmission of loads between slabs and shores, during the construction of slabs using successive levels of shoring. This study is part of the research project “Estudio experimental y numérico de la construcción de forjados hormigonados in situ mediante sistemas de cimbrado y descimbrado”, funded by Ministerio de Educación y Ciencia de España, project BIA 2004-02085. This research was performed in Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH), Universidad Politécnica de Valencia.

To determine the influence of clearing on the transmission of loads between slabs and shores, an experimental study was carried out. In this study, we measured the distribution of loads on shores during the construction of a full-scale 3-storey building, with thick slabs made up of reinforced concrete. From the experimental study, it has been demonstrated that after clearing, a significant part of the loads (self weight) are transferred to slabs.

In another phase of the research, a finite element model has been developed, the objective being the simulation of the construction process followed in the building analysed in the experimental study. The finite element model has been calibrated by comparing experimental and numerical results. Once the model has been calibrated, new models have been developed in order to compare different construction processes.

In the last part of the thesis, the degree of adjustment between various simplified methods available in the literature has been checked. Advantages and disadvantages of each method have been presented, with regard to the estimation of the transmission of loads between slabs and shores when the clearing operation is used.

**Keywords:** Clearing; Shoring; Striking; Shore; Reinforced concrete buildings; Slabs; Experimental study; Finite element method.



# INDICE GENERAL

## INDICE DE FIGURAS

## INDICE DE TABLAS

## NOTACIÓN Y ABREVIATURAS

## CAPITULO 1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

1.2. Objetivos

1.3. Contenido

## CAPITULO 2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción

2.2. Sistemas y procesos de cimbrado para forjados de edificación hormigonados in situ

2.2.1. Apuntalamiento en un proceso de cimbrado y descimbrado

2.2.2. Apuntalamiento en un proceso de cimbrado, recimbrado y descimbrado

2.2.3. Apuntalamiento en un proceso de cimbrado, clareado y descimbrado

2.3. Transmisión de cargas durante la construcción

2.3.1. Modelos Teóricos

2.3.1.1. Método simplificado de Grundy y Kabaila (1963)

2.3.1.2. Método simplificado para recimbrado Taylor (1967)

2.3.1.3. Modelo de Liu et al. (1985, 1986)

2.3.1.4. Modelo EFM de Stivaros y Halvorsen (1990)

2.3.1.5. Modelo de Mosallam y Chen (1991)

2.3.1.6. Método simplificado de Modificado Mosallam y Chen (1991)

2.3.1.7. Modelo de Moragues et al. (1992, 1994, 1996)

2.3.1.8. Método Simplificado de Duan y Chen (1995)

2.3.1.9. Método simplificado de Fang et al. (2001)

2.3.1.10. Métodos propuestos por Beeby (2001)

2.3.1.11. Estudio realizado por Díaz (2008)

2.3.2. Estudios Experimentales

2.3.2.1. Medidas realizadas por Agarwal y Gardner (1974)

2.3.2.2. Medidas realizadas por Lasisi (1979)

2.3.2.3. Medidas realizadas por Moragues et al. (1992)

2.3.2.4. Medidas realizadas por Ambrose et al. (1994)

2.3.2.5. Medidas realizadas por Rosowsky et al. (1997)

2.3.2.6. Medidas realizadas por Beeby (2001)

2.3.2.7. Medidas realizadas por Fang et al. (2001)

2.3.2.8. Medidas realizadas por Puente et al. (2007)

## 2.4. Estimación del plazo de descimbrado

### 2.4.1. Condición de descimbrado

2.4.1.1. Método propuesto por Calavera (1981) y Fernández (1986)

2.4.1.2. Método propuesto por Marí (1995)

2.4.1.3. Método por comprobación de coeficientes de carga

### 2.4.2. Estimación del plazo de descimbrado

2.4.2.1. Método mediante el ensayo de probetas de hormigón.

2.4.2.2. Método de las curvas de referencia

2.4.2.3. Aplicación del método de la madurez al descimbrado de forjados de hormigón

2.4.2.4. Método de Díaz (2008)

### 2.4.3. Recomendaciones de la normativa para estimar los plazos de descimbrado

2.4.3.1. Instrucción de hormigón estructural (EHE)

2.4.3.2. Eurocódigo EC-2 (1992)

2.4.3.3. ACI 347 (American Concrete Institute, Guide to formwork for concrete) (2001)

2.4.3.4. Código modelo CEB-FIP 1990 (1995)

## 2.5. Conclusiones relativas al estado del arte

# **CAPITULO 3. PLANTEAMIENTO DEL MODELO EXPERIMENTAL**

## 3.1. Introducción

## 3.2. Descripción de la estructura

3.2.1. Materiales

3.2.2. Terreno de cimentación

3.2.3. Coeficientes de seguridad

3.2.4. Acciones

3.2.5. Cálculos estructurales

## 3.3. Estimación del plazo de operaciones de hormigonado, clareado y descimbrado

3.3.1. Datos de partida

3.3.2. Condición

- 3.3.3. Estimación de cargas método simplificado (Grundy y Kabaila, 1963)
- 3.3.4. Estimación de cargas coeficientes de Moragues et al. (1992, 1994)
- 3.4. Proceso constructivo
- 3.5. Descripción del sistema de cimbrado
  - 3.5.1. Puntales
  - 3.5.2. Sopandas principales
  - 3.5.3. Sopandas intermedias
  - 3.5.4. Basculantes
  - 3.5.5. Tableros de encofrado
  - 3.5.6. Portasopandas
- 3.6. Instrumentación
  - 3.6.1. Puntales
    - 3.6.1.1. Proceso de instrumentación
    - 3.6.1.2. Distribución de puntales instrumentados en las fases de construcción
  - 3.6.2. Temperatura
  - 3.6.3. Deformación de los forjados
  - 3.6.4. Sistemas de adquisición de datos
- 3.7. Plan de ensayos de laboratorio
  - 3.7.1. Ensayos previos a la ejecución del edificio
  - 3.7.2. Ensayos durante la construcción del edificio
- 3.8. Conclusiones relativas al planteamiento del modelo experimental

## **CAPITULO 4. RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL**

- 4.1. Introducción
- 4.2. Cargas instantáneas
  - 4.2.1. Hormigonado forjado 1
  - 4.2.2. Clareado forjado 1
  - 4.2.3. Hormigonado forjado 2
  - 4.2.4. Clareado del forjado 2
  - 4.2.5. Descimbrado forjado 1
  - 4.2.6. Hormigonado forjado 3
  - 4.2.7. Clareado forjado 3
  - 4.2.8. Carga en el forjado 3
  - 4.2.9. Descimbrado forjado 2
  - 4.2.10. Resumen medición instantánea

#### 4.3. Cargas en medición continua

4.3.1. Hormigonado del forjado 1

4.3.2. Clareado del forjado 1

4.3.3. Hormigonado del forjado 2

4.3.4. Clareado del forjado 2

4.3.5. Descimbrado del forjado 1

4.3.6. Hormigonado del forjado 3

4.3.7. Clareado del forjado 3

4.3.8. Carga en el forjado 3

4.3.9. Descimbrado del forjado 2

4.3.10. Resumen medición continua

#### 4.4. Conclusiones relativas a los resultados del estudio experimental

### **CAPITULO 5. ESTUDIO POR EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS**

#### 5.1. Introducción

#### 5.2. Hipótesis del modelo de EF

#### 5.3. Descripción del modelo de EF

5.3.1. Tipos de EF y mallado empleado

5.3.2. Desarrollo del modelo

#### 5.4. Verificación y análisis del modelo de EF

5.4.1. Paso de carga 1 (Hormigonado del forjado 1)

5.4.2. Paso de carga 2 (Clareado del forjado 1)

5.4.3. Paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2)

5.4.4. Paso de carga 4 (Clareado del forjado 2)

5.4.5. Paso de carga 5 (Descimbrado del forjado 1)

5.4.6. Paso de carga 6 (Hormigonado del forjado 3)

5.4.7. Paso de carga 7 (Clareado del forjado 3)

5.4.8. Paso de carga 8 (Carga en el forjado 3)

5.4.9. Paso de carga 9 (Descimbrado del forjado 2)

5.4.10. Resumen de la verificación del modelo de EF

#### 5.5. Comparación del proceso de CCD con un proceso de CD

5.5.1. Paso de carga 1 (Hormigonado del forjado 1)

5.5.2. Paso de carga 2 (Hormigonado del forjado 2)

5.5.3. Paso de carga 3 (Descimbrado del forjado 1)

- 5.5.4. Paso de carga (Hormigonado del forjado 3)
- 5.5.5. Paso de carga 5 (Carga en el forjado 3)
- 5.5.6. Paso de carga 6 (Descimbrado del forjado 2)
- 5.5.7. Resumen de la comparación entre el proceso de CD, y el proceso de CCD.
- 5.6. Comparación del proceso de CCD con un proceso de CRD
  - 5.6.1. Paso de carga 1 (Hormigonado del forjado 1)
  - 5.6.2. Paso de carga 2 (Recimbrado del forjado 1)
  - 5.6.3. Paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2)
  - 5.6.4. Paso de carga 4 (Recimbrado del forjado 2)
  - 5.6.5. Paso de carga 5 (Descimbrado del forjado 1)
  - 5.6.6. Paso de carga 6 (Hormigonado del forjado 3)
  - 5.6.7. Paso de carga 7 (Recimbrado del forjado 3)
  - 5.6.8. Paso de carga 8 (Carga en el forjado 3)
  - 5.6.9. Paso de carga 9 (Descimbrado del forjado 2)
  - 5.6.10. Resumen de la comparación entre el proceso de CRD y el proceso de CCD
- 5.7. Conclusiones relativas al estudio por el método de los EF

## **CAPITULO 6. COMPARACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS Y LAS ESTIMACIONES DE MODELOS TEÓRICOS**

- 6.1. Introducción
- 6.2. Métodos teóricos analizados
  - 6.2.1. Método simplificado de Duan y Chen (1995)
  - 6.2.2. Método simplificado de Fang et al. (2001)
  - 6.2.3. Método simplificado de Beeby (2001)
  - 6.2.4. Resumen de la aplicación de métodos teóricos simplificados
- 6.3. Comparación de los resultados obtenidos
  - 6.3.1. Método simplificado de Duan y Chen (1995)
  - 6.3.2. Método simplificado de Fang et al. (2001)
  - 6.3.3. Método simplificado de Beeby (2001)
- 6.4. Conclusiones relativas a la comparación entre los resultados obtenidos y las estimaciones de modelos teóricos

## **CAPITULO 7. CONCLUSIONES Y PROPUESTA DE NUEVAS INVESTIGACIONES**

- 7.1. Conclusiones
- 7.2. Aportación original de la Tesis Doctoral
- 7.3. Propuesta de nuevas investigaciones

## **REFERENCIAS**

## **APÉNDICES**

Apéndice I. Planos del modelo experimental

Apéndice II. Reportaje fotográfico del estudio experimental

Apéndice III. Deformaciones en los forjados durante la construcción del modelo experimental

Apéndice IV. Resultados de los ensayos del hormigón de los forjados

Apéndice V. Aplicación de la técnica de la madurez para predecir la evolución del módulo de elasticidad de cada uno de los forjados

## INDICE DE FIGURAS

- Fig. 2.1 Sistema de losas (ALSINA 2009)
- Fig. 2.2 Sistema para reticulares (ALSINA 2009)
- Fig. 2.3 Sistema de puntales con arriostramiento lateral (ALSINA 2009)
- Fig. 2.4 Sistema de mesas
- Fig. 2.5 Proceso de cimbrado y descimbrado
- Fig. 2.6 Proceso de cimbrado, recimbrado, descimbrado
- Fig. 2.7 Proceso de cimbrado, clareado y descimbrado
- Fig. 2.8 Mecanismo para realizar el clareado (ALSINA 2009)
- Fig. 2.9 Operaciones de cimbrado y descimbrado  $n=3$
- Fig. 2.10 Coeficientes de carga para puntales y forjados  $n=2$
- Fig. 2.11 Coeficientes de carga para puntales y forjados  $n=3$
- Fig. 2.12 Coeficientes de carga para puntales y forjados considerando la variación del módulo de elasticidad  $n=3$
- Fig. 2.13 Coeficientes de carga para puntales y forjados  $n=2$  (Recimbrado)
- Fig. 2.14 Modelo estructural Modelo de Liu et al. (1985)
- Fig. 2.15 Influencia de la rigidez de la cimentación
- Fig. 2.16 Resultados del modelo EMF comparado con distintos modelos numéricos
- Fig. 2.17 Coeficientes de carga máximos para un forjado recimbrado
- Fig. 2.18 Coeficientes de carga máximos para dos forjados recimbrados
- Fig. 2.19 Historial de cargas para los primeros tres forjados (a) Caso “A” (b) Caso “B”
- Fig. 2.20 Comparación de resultados entre el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963) y el modelo de Mosallam et al. (1991)
- Fig. 2.21 Coeficientes de carga modelo Moragues et al. (1996) para dos plantas cimbradas
- Fig. 2.22 Coeficientes de carga modelo Moragues et al. (1996) para tres plantas cimbradas
- Fig. 2.23 Operaciones de (a) Hormigonado del último forjado (b) Descimbrado del primer forjado
- Fig. 2.24 Sistema de puntales para dos niveles de cimbrado
- Fig. 2.25 Evolución de cargas en puntales medida por Fang et al.
- Fig. 2.26 Evolución de carga en puntales medida por Puente et al. (2007)
- Fig. 2.27 Evolución de la resistencia a tracción, en función de la resistencia a tracción a 28 días (Cemento P-450 ARI)
- Fig. 2.28 Evolución de la resistencia a tracción, en función de la resistencia a tracción a 28 días (Cemento P-350)
- Fig. 2.29 Evolución de la resistencia a tracción, en función de la resistencia a tracción a 28 días (Cemento PA-350 Adición escoria)
- Fig. 2.30 Evolución de la resistencia a tracción, en función de la resistencia a tracción a 28 días (Cemento PA-350 Adición puzolana)
- Fig. 2.31 Relación de  $\beta$  con respecto a la relación entre  $f_{ck,j}/f_{ck,28}$

- Fig. 2.32 Curvas para determinar el plazo de descimbrado (Hormigón de 25 MPa. y cemento de endurecimiento rápido  $s= 0.20$ )
- Fig. 2.33 Curvas para determinar el plazo de descimbrado (Hormigón de 25 MPa., y cemento de endurecimiento normal  $s= 0.25$ )
- Fig. 2.34 Curvas para determinar el plazo de descimbrado (Hormigón de 25 MPa., y cemento de endurecimiento lento  $s= 0.38$ )
- Fig. 2.35 Curva para estimar el plazo de descimbrado en función de la evolución de la resistencia a tracción Díaz (2008)
- Fig. 3.1 Vista 3D del edificio proyectado
- Fig. 3.2 Curva para determinar el plazo de descimbrado (Hormigón de 25 MPa., y cemento de endurecimiento normal  $s = 0.25$ )
- Fig. 3.3 Proceso constructivo día “0”
- Fig. 3.4 Proceso constructivo día “3”
- Fig. 3.5 Proceso constructivo día “7”
- Fig. 3.6 Proceso constructivo día “8”
- Fig. 3.7 Proceso constructivo día “14”
- Fig. 3.8 Proceso constructivo día “17”
- Fig. 3.9 Proceso constructivo día “20”
- Fig. 3.10 Proceso constructivo día “24”
- Fig. 3.11 Proceso constructivo día “25”
- Fig. 3.12 Puntal empleado en el estudio experimental
- Fig. 3.13 Descripción de las sopandas principales
- Fig. 3.14 Extracción del basculante de las sopandas principales
- Fig. 3.15 Distribución de sopandas principales y secundarias en los forjados
- Fig. 3.16 Proceso de pulido de puntales (a) Pulido de la superficie del puntal para el pegado de las galgas (b) Superficie del puntal una vez pulido
- Fig. 3.17 Replanteo de bandas extensométricas (a) Posicionamiento de plantilla para el replanteo (b) Marcado de la superficie del puntal
- Fig. 3.18 Pegado de bandas extensométricas (a) Banda extensométrica suministrada por HBM (b) Galga pegada en la superficie del puntal
- Fig. 3.19 Protección de bandas extensométricas (a) Aplicación del esmalte de poliuretano (b) Armaflex sometido a presión de agua
- Fig. 3.20 Conexión de bandas extensométricas (a) Conector para tres bandas extensométricas (b) Cables prolongadores de las bandas extensométricas al sistema de adquisición de datos
- Fig. 3.21 Distribución de puntales instrumentados forjado 1 (a) Hormigonado (b) Clareado
- Fig. 3.22 Distribución de puntales instrumentados forjado 2 (a) Hormigonado (b) Clareado
- Fig. 3.23 Distribución de puntales instrumentados forjado 3 (a) Hormigonado (b) Clareado
- Fig. 3.24 Termopar tipo J (a) Termopar con conector tipo J (b) Termopar embebido en el hormigón
- Fig. 3.25 Distribución de termopares en los forjados

- Fig. 3.26 Deformación de los forjados (a) LVDT instalado en la pértiga (b) Pértiga instalada entre los forjados 1 y 2
- Fig. 3.27 Distribución de los LVDTs en los forjados
- Fig. 3.28 Módulos de adquisición de datos (a) Módulo de red FP-1601 (b) Trenes de módulos de adquisición de datos con cables prolongadores a los instrumentos de medición
- Fig. 3.29 Sistema adquisición y almacenamiento de datos (a) Disposición de los equipos en la caseta (b) Lectura en tiempo real del hormigonado del primer forjado
- Fig. 3.30 Marco metálico y puntal listo para ser ensayado
- Fig. 3.31 Ensayo puntal 1 (a) Rotura del pasador del puntal (b) Diagrama fuerza acortamiento
- Fig. 3.32 Ensayo puntal 2 (a) Rotura del pasador del puntal (b) Diagrama fuerza acortamiento
- Fig. 3.33 Ensayo puntal 3 (a) Rotura del pasador del puntal (b) Diagrama fuerza acortamiento
- Fig. 4.1 Resultados medición instantánea. Hormigonado del forjado 1
- Fig. 4.2 Isolíneas de carga en puntales bajo el forjado 1. Hormigonado del forjado 1 (kN)
- Fig. 4.3 Resultados medición instantánea. Clareado del forjado 1
- Fig. 4.4 Isolíneas de carga en puntales bajo el forjado 1. Clareado del forjado 1 (kN)
- Fig. 4.5 Resultados medición instantánea. Hormigonado del forjado 2
- Fig. 4.6 Isolíneas de carga en puntales bajo el forjado 1. Hormigonado del forjado 2 (kN)
- Fig. 4.7 Isolíneas de carga en puntales bajo el forjado 2. Hormigonado del forjado 2 (kN)
- Fig. 4.8 Resultados medición instantánea. Clareado del forjado 2
- Fig. 4.9 Isolíneas de carga en puntales bajo el forjado 1. Clareado del forjado 2 (kN)
- Fig. 4.10 Isolíneas de carga en puntales bajo el forjado 2. Clareado del forjado 2 (kN)
- Fig. 4.11 Resultados medición instantánea. Descimbrado del forjado 1
- Fig. 4.12 Isolíneas de carga en puntales bajo el forjado 2. Descimbrado forjado 1 (kN)
- Fig. 4.13 Resultados medición instantánea. Hormigonado del forjado 3
- Fig. 4.14 Isolíneas de carga en puntales bajo el forjado 2. Hormigonado del forjado 3 (kN)
- Fig. 4.15 Isolíneas de carga en puntales bajo el forjado 3. Hormigonado del forjado 3 (kN)
- Fig. 4.16 Resultados medición instantánea. Clareado del forjado 3
- Fig. 4.17 Isolíneas de carga en puntales bajo el forjado 2. Clareado del forjado 3 (kN)
- Fig. 4.18 Isolíneas de carga en puntales bajo el forjado 3. Clareado del forjado 3 (kN)
- Fig. 4.19 Resultados medición instantánea. Carga en el forjado 3 (Carga de  $3.70 \text{ kN/m}^2$ )
- Fig. 4.20 Resultados medición instantánea. Carga en el forjado 3 (Carga de  $5.64 \text{ kN/m}^2$ )
- Fig. 4.21 Isolíneas de carga en puntales bajo el forjado 2. Carga en el forjado 3 (kN)
- Fig. 4.22 Isolíneas de carga en puntales bajo el forjado 3. Carga en el forjado 3 (kN)
- Fig. 4.23 Resultados medición instantánea. Carga en el forjado 3
- Fig. 4.24 Isolíneas de carga en puntales Forjado 3. Descimbrado forjado 2 (kN)
- Fig. 4.25 Coeficientes de carga media en el forjado 1
- Fig. 4.26 Coeficientes de carga media en puntales bajo el forjado 1
- Fig. 4.27 Coeficientes de carga media en el forjado 2
- Fig. 4.28 Coeficientes de carga media en puntales bajo el forjado 2
- Fig. 4.29 Coeficientes de carga media en el forjado 3
- Fig. 4.30 Coeficientes de carga media en puntales bajo el forjado 3

- Fig. 4.31 Resultados medición continua. Hormigonado del forjado 1
- Fig. 4.32 Resultados medición continua. Entre el hormigonado y antes del clareado del forjado 1
- Fig. 4.33 (a) Coeficiente de carga media en puntales entre el hormigonado y antes del clareado del forjado 1. (b) Carga en puntales más cargados entre el hormigonado y antes del clareado del forjado 1
- Fig. 4.34 Resultados medición continua isolíneas de carga en puntales del forjado 1. (a) Hormigonado del forjado 1. (b) Antes del clareado del forjado 1 (kN)
- Fig. 4.35 Resultados medición continua. Clareado del forjado 1
- Fig. 4.36 Resultados medición continua. Entre el hormigonado y antes del hormigonado del forjado 2
- Fig. 4.37 (a) Coeficiente de carga media en puntales del forjado 1 antes del hormigonado del forjado 2. (b) Carga en el puntal 48 antes del hormigonado del forjado 2
- Fig. 4.38 Resultados medición continua isolíneas de carga en puntales del forjado 1. (a) Clareado del forjado 1. (b) Antes del hormigonado del forjado 2 (kN)
- Fig. 4.39 Resultados medición continua. Hormigonado del forjado 2
- Fig. 4.40 Resultados medición continua. Entre el hormigonado y antes del clareado del forjado 2
- Fig. 4.41 Coeficiente de carga media en puntales del forjado 1 antes del clareado del forjado 2
- Fig. 4.42 Carga en el puntal 45 antes del Clareado del forjado 2
- Fig. 4.43 (a) Coeficiente de carga media en puntales del forjado 2 antes del clareado del forjado 2. (b) Carga en el puntal 18 antes del clareado del forjado 2
- Fig. 4.44 Resultados medición continua isolíneas de carga en puntales del forjado 1. (a) Hormigonado del forjado 2. (b) Antes del clareado del forjado 2 (kN)
- Fig. 4.45 Resultados medición continua isolíneas de carga en puntales del forjado 2. (a) Hormigonado del forjado 2. (b) Antes del clareado del forjado 2 (kN)
- Fig. 4.46 Resultados medición continua. Clareado del forjado 2
- Fig. 4.47 Resultados medición continua. Entre el clareado del forjado 2 y antes del descimbrado del forjado 1
- Fig. 4.48 Coeficiente de carga media en puntales del forjado 1 antes del descimbrado del forjado 1
- Fig. 4.49 Carga en el puntal 45 antes del descimbrado del forjado 1
- Fig. 4.50 (a) Coeficiente de carga media en puntales del forjado 2 antes del descimbrado del forjado 1. (b) Carga en el puntal 35 antes del descimbrado del forjado 1
- Fig. 4.51 Resultados medición continua isolíneas de carga en puntales del forjado 1. (a) Clareado del forjado 2. (b) Antes del descimbrado del forjado 1 (kN)
- Fig. 4.52 Resultados medición continua isolíneas de carga en puntales del forjado 2. (a) Clareado del forjado 2. (b) Antes del descimbrado del forjado 2 (kN)
- Fig. 4.53 Resultados medición continua. Descimbrado del forjado 1
- Fig. 4.54 Resultados medición continua. Entre el descimbrado del forjado 1 y antes del hormigonado del forjado 3
- Fig. 4.55 (a) Coeficiente de carga media en puntales del forjado 2 antes del hormigonado del forjado 3. (b) Carga en el puntal 35 antes del hormigonado del forjado 3

- Fig. 4.56 Resultados medición continua isolíneas de carga en puntales del forjado 2. (a) Descimbrado del forjado 1. (b) Antes del hormigonado del forjado 3 (kN)
- Fig. 4.57 Resultados medición continua. Hormigonado del forjado 3
- Fig. 4.58 Resultados medición continua. Entre el hormigonado del forjado 3 y antes del clareado del forjado 3
- Fig. 4.59 Coeficiente de carga media en puntales del forjado 2 antes del clareado del forjado 3
- Fig. 4.60 Carga en el puntal 35 antes del clareado del forjado 3
- Fig. 4.61 (a) Coeficiente de carga media en puntales del forjado 3 antes del clareado del forjado 3. (b) Carga en el puntal 18 antes del clareado del forjado 3
- Fig. 4.62 Resultados medición continua isolíneas de carga en puntales del forjado 2. (a) Hormigonado del forjado 3. (b) Antes del clareado del forjado 3 (kN)
- Fig. 4.63 Resultados medición continua isolíneas de carga en puntales del forjado 3. (a) Hormigonado del forjado 3. (b) Antes del clareado del forjado 3 (kN)
- Fig. 4.64 Resultados medición continua. Clareado del forjado 3
- Fig. 4.65 Resultados medición continua. Entre el clareado del forjado 3 y antes la carga en el forjado 3
- Fig. 4.66 Coeficiente de carga media en puntales del forjado 2 antes de la carga en el forjado 3
- Fig. 4.67 Carga en el puntal 35 antes de la carga en el forjado 3
- Fig. 4.68 (a) Coeficiente de carga media en puntales del forjado 3 antes de la carga en el forjado 3. (b) Carga en el puntal 28 antes de la carga en el forjado 3
- Fig. 4.69 Resultados medición continua isolíneas de carga en puntales del forjado 2. (a) Clareado del forjado 3. (b) Antes de la carga en el forjado 3 (kN)
- Fig. 4.70 Resultados medición continua isolíneas de carga en puntales del forjado 3. (a) Clareado del forjado 3. (b) Antes de la carga en el forjado 3 (kN)
- Fig. 4.71 Resultados medición continua. Carga en el forjado 3
- Fig. 4.72 Resultados medición continua. Entre la carga del forjado 3 y antes del descimbrado del forjado 2
- Fig. 4.73 Coeficiente de carga media en puntales del forjado 2 antes del descimbrado del forjado 2
- Fig. 4.74 Carga en el puntal 35 antes del descimbrado del forjado 2
- Fig. 4.75 Coeficiente de carga media en puntales del forjado 3 antes del descimbrado del forjado 2
- Fig. 4.76 Carga en el puntal 28 antes del descimbrado del forjado 2
- Fig. 4.77 Resultados medición continua isolíneas de carga en puntales del forjado 2. (a) Carga en el forjado 3. (b) Antes del descimbrado del forjado 2 (kN)
- Fig. 4.78 Resultados medición continua isolíneas de carga en puntales del forjado 3. (a) Carga en el forjado 3. (b) Antes del descimbrado del forjado 2 (kN)
- Fig. 4.79 Resultados medición continua. Descimbrado del forjado 2
- Fig. 4.80 Coeficiente de carga media en puntales del forjado 3 hasta el final de las operaciones constructivas
- Fig. 4.81 Carga en el puntal 28 hasta el final de las operaciones constructivas
- Fig. 4.82 Resultados medición continua isolíneas de carga en puntales del forjado 3. Descimbrado forjado 2
- Fig. 5.1 Elemento SHELL63 (ANSYS 11.0 2007)

- Fig. 5.2 Elemento LINK10 (ANSYS 11.0 2007)
- Fig. 5.3 Elemento BEAM44 (ANSYS 11.0 2007)
- Fig. 5.4 Vista tridimensional del modelo de EF
- Fig. 5.5 Hormigonado del forjado 1
- Fig. 5.6 Clareado del forjado 1
- Fig. 5.7 Hormigonado del forjado 2
- Fig. 5.8 Clareado del forjado 2
- Fig. 5.9 Descimbrado del forjado 1
- Fig. 5.10 Hormigonado del forjado 3
- Fig. 5.11 Clareado del forjado 3
- Fig. 5.12 Clareado del forjado 3
- Fig. 5.13 Clareado del forjado 3
- Fig. 5.14 Resultados del modelo numérico. Paso de carga 1 (Hormigonado del forjado 1)
- Fig. 5.15 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. Hormigonado del forjado 1. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)
- Fig. 5.16 Resultados del modelo numérico. Paso de carga 2 (Clareado del forjado 1)
- Fig. 5.17 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. Clareado del forjado 1. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)
- Fig. 5.18 Resultados del modelo numérico. Paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2)
- Fig. 5.19 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. Hormigonado del forjado 2. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)
- Fig. 5.20 Distribución de cargas en puntales del forjado 2. Hormigonado del forjado 2. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)
- Fig. 5.21 Resultados del modelo numérico. Paso de carga 4 (Clareado del forjado 2)
- Fig. 5.22 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. Clareado del forjado 2. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)
- Fig. 5.23 Distribución de cargas en puntales del forjado 2. Clareado del forjado 2. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)
- Fig. 5.24 Resultados del modelo numérico. Paso de carga 5 (Descimbrado del forjado 1)
- Fig. 5.25 Distribución de cargas en puntales del forjado 2. Descimbrado del forjado 1. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)
- Fig. 5.26 Resultados del modelo numérico. Paso de carga 6 (Hormigonado del forjado 3)
- Fig. 5.27 Distribución de cargas en puntales del forjado 2. Hormigonado del forjado 3. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)
- Fig. 5.28 Distribución de cargas en puntales del forjado 3. Hormigonado del forjado 3. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)
- Fig. 5.29 Resultados del modelo numérico. Paso de carga 7 (Clareado del forjado 3)
- Fig. 5.30 Distribución de cargas en puntales del forjado 2. Clareado del forjado 3. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)

- Fig. 5.31 Distribución de cargas en puntales del forjado 3. Clareado del forjado 3. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)
- Fig. 5.32 Resultados del modelo numérico. Paso de carga 8 (Carga en el forjado 3)
- Fig. 5.33 Distribución de cargas en puntales del forjado 2. Carga en el forjado 3. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)
- Fig. 5.34 Distribución de cargas en puntales del forjado 3. Carga en el forjado 3. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)
- Fig. 5.35 Resultados del modelo numérico. Paso de carga 9 (Descimbrado del forjado 2)
- Fig. 5.36 Distribución de cargas en puntales del forjado 3. Descimbrado del forjado 2. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)
- Fig. 5.37 Pasos de carga del modelo de EF para el proceso de CD
- Fig. 5.38 Resultados del proceso de CD, y del proceso de CCD. Paso de carga 1 (Hormigonado del forjado 1)
- Fig. 5.39 Distribución de cargas en puntales del forjado 1 Hormigonado del forjado 1. Proceso de CD, y proceso de CCD (kN)
- Fig. 5.40 Resultados del proceso de CD. Paso de carga 2 (Hormigonado del forjado 2)
- Fig. 5.41 Resultados del proceso de CCD. Paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2)
- Fig. 5.42 Distribución de cargas en puntales del forjado 1 Hormigonado del forjado 2. (a) Proceso de CD (b) Proceso de CCD (kN)
- Fig. 5.43 Distribución de cargas en puntales del forjado 2 Hormigonado del forjado 2. (a) Proceso de CD (b) Proceso de CCD (kN)
- Fig. 5.44 Resultados del proceso de CD. Paso de carga 3 (Descimbrado del forjado 1)
- Fig. 5.45 Resultados del proceso de CCD. Paso de carga 5 (Descimbrado del forjado 1)
- Fig. 5.46 Distribución de cargas en puntales del forjado 2 Descimbrado del forjado 1. (a) Proceso de CD (b) Proceso de CCD (kN)
- Fig. 5.47 Resultados del proceso de CD. Paso de carga 4 (Hormigonado del forjado 3)
- Fig. 5.48 Resultados del proceso de CCD. Paso de carga 6 (Hormigonado del forjado 3)
- Fig. 5.49 Distribución de cargas en puntales del forjado 2 Hormigonado del forjado 3. (a) Proceso de CD (b) Proceso de CCD (kN)
- Fig. 5.50 Distribución de cargas en puntales del forjado 3. Hormigonado del forjado 3. (a) Proceso de CD (b) Proceso de CCD (kN)
- Fig. 5.51 Resultados del proceso de CD. Paso de carga 5 (Carga en el forjado 3)
- Fig. 5.52 Resultados del proceso de CCD. Paso de carga 8 (Carga en el forjado 3)
- Fig. 5.53 Distribución de cargas en puntales del forjado 2. Carga en el forjado 3. (a) Proceso de CD (b) Proceso de CCD (kN)
- Fig. 5.54 Distribución de cargas en puntales del forjado 3. Carga en el forjado 3. (a) Proceso de CD (b) Proceso de CCD (kN)
- Fig. 5.55 Resultados del proceso de CD. Paso de carga 6 (Descimbrado del forjado 2)
- Fig. 5.56 Resultados del proceso de CCD. Paso de carga 9 (Descimbrado del forjado 2)
- Fig. 5.57 Distribución de cargas en puntales del forjado 3 Descimbrado del forjado 2. (a) Proceso de CD (b) Proceso de CCD (kN)
- Fig. 5.58 Coeficientes de carga media del forjado 1

- Fig. 5.59 Coeficientes de carga en puntales bajo el forjado 1
- Fig. 5.60 Coeficientes de carga media del forjado 2
- Fig. 5.61 Coeficientes de carga en puntales bajo el forjado 2
- Fig. 5.62 Coeficientes de carga media del forjado 3
- Fig. 5.63 Coeficientes de carga en puntales bajo el forjado 3
- Fig. 5.64 Pasos de carga del modelo de EF para el proceso de CRD
- Fig. 5.65 Resultados proceso de CRD, y proceso de CCD. Paso de carga 1 (Hormigonado del forjado 1)
- Fig. 5.66 Distribución de cargas en puntales del forjado 1 Hormigonado del forjado 1. Proceso de CRD y proceso de CCD (kN)
- Fig. 5.67 Resultados proceso de CRD. Paso de carga 2 (Recimbrado del forjado 1)
- Fig. 5.68 Resultados proceso de CCD. Paso de carga 2 (Clareado del forjado 1)
- Fig. 5.69 Resultados del proceso de CRD. Paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2)
- Fig. 5.70 Resultados del proceso de CCD. Paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2)
- Fig. 5.71 Distribución de cargas en puntales del forjado 1 Hormigonado del forjado 2. (a) Proceso de CRD (b) Proceso de CCD (kN)
- Fig. 5.72 Distribución de cargas en puntales del forjado 2 Hormigonado del forjado 2. (a) Proceso de CRD (b) Proceso de CCD (kN)
- Fig. 5.73 Resultados del proceso de CRD. Paso de carga 4 (Recimbrado del forjado 2)
- Fig. 5.74 Resultados del proceso de CCD. Paso de carga 4 (Clareado del forjado 2)
- Fig. 5.75 Resultados del proceso de CRD. Paso de carga 5 (Descimbrado del forjado 1)
- Fig. 5.76 Resultados del proceso de CCD. Paso de carga 5 (Descimbrado del forjado 1)
- Fig. 5.77 Resultados del proceso de CRD. Paso de carga 6 (Hormigonado del forjado 3)
- Fig. 5.78 Resultados del proceso de CCD. Paso de carga 6 (Hormigonado del forjado 3)
- Fig. 5.79 Distribución de cargas en puntales del forjado 2. Hormigonado del forjado 3. (a) Proceso de CRD (b) Proceso de CCD (kN)
- Fig. 5.80 Distribución de cargas en puntales del forjado 3. Hormigonado del forjado 3. (a) Proceso de CRD (b) Proceso de CCD (kN)
- Fig. 5.81 Resultados del proceso de CRD. Paso de carga 7 (Recimbrado del forjado 3)
- Fig. 5.82 Resultados del proceso de CCD. Paso de carga 7 (Clareado del forjado 3)
- Fig. 5.83 Resultados del proceso de CRD. Paso de carga 8 (Carga en el forjado 3)
- Fig. 5.84 Resultados del proceso de CCD. Paso de carga 8 (Carga en el forjado 3)
- Fig. 5.85 Distribución de cargas en puntales del forjado 2. Carga en el forjado 3. (a) Proceso de CRD (b) Proceso de CCD (kN)
- Fig. 5.86 Distribución de cargas en puntales del forjado 3. Carga en el forjado 3. (a) Proceso de CRD (b) Proceso de CCD (kN)
- Fig. 5.87 Resultados del proceso de CRD. Paso de carga 9 (Descimbrado del forjado 2)
- Fig. 5.88 Resultados del proceso de CCD. Paso de carga 9 (Descimbrado del forjado 2)

- Fig. 5.89 Distribución de cargas en puntales del forjado 3. Descimbrado del forjado 2. (a) Proceso de CRD (b) Proceso de CCD (kN)
- Fig. 5.90 Coeficientes de carga media del forjado 1
- Fig. 5.91 Coeficientes de carga en puntales bajo el forjado 1
- Fig. 5.92 Coeficientes de carga media del forjado 2
- Fig. 5.93 Coeficientes de carga en puntales bajo el forjado 2
- Fig. 5.94 Coeficientes de carga media del forjado 3
- Fig. 5.95 Coeficientes de carga en puntales bajo el forjado 3
- Fig. 6.1 Coeficientes de carga método simplificado de Duan y Chen (1995)
- Fig. 6.2 Coeficientes de carga método simplificado de Fang et al. (1995)
- Fig. 6.3 Coeficientes de carga método simplificado de Beeby (2001)

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Coefficientes máximos en puntales modelos Liu, Chen y Bowman (1985)
Tabla 2.2	Comparación entre los modelos de Grundy y Kabaila (1963) y los modelos de Mosallam y Chen (1991) para el caso de tres plantas cimbradas
Tabla 2.3	Comparación entre los modelos de Grundy y Kabaila (1963) y los modelos de Mosallam y Chen (1991) para el caso de dos plantas cimbradas y una recimbrada
Tabla 2.4	Coefficientes máximos de carga en forjados
Tabla 2.5	Coefficientes máximos de carga en puntales (Cimentación)
Tabla 2.6	Coefficientes máximos de carga en puntales (Casos Restantes)
Tabla 2.7	Comparación entre los métodos simplificados de Grundy y Kabaila y de Duan y Chen para el caso de dos forjados cimbrados y uno recimbrado.
Tabla 2.8	Comparación de coeficientes de carga en forjados por diferentes modelos y el modelo de Fang et al. para el caso de dos forjados cimbrados y uno recimbrado
Tabla 2.9	Porcentaje de distribución de cargas durante el proceso constructivo
Tabla 2.10	Comparación entre los coeficientes de carga en vigas (vano central), durante el proceso constructivo para puntales con rigidez finita e infinita Díaz (2008)
Tabla 2.11	Coefficientes máximos de carga en forjados
Tabla 2.12	Coefficientes máximos de carga en puntales (Cimentación)
Tabla 2.13	Coefficientes máximos de carga en puntales (casos restantes)
Tabla 2.14	Distribución de cargas en puntales y forjados (Hormigonado forjado 2)
Tabla 2.15	Distribución de cargas en puntales y forjados (Descimbrado forjado 1 y forjado 2)
Tabla 2.16	Distribución de cargas en puntales y forjados (Montaje cimbra y acero forjado 3)
Tabla 2.17	Distribución de cargas en puntales y forjados (Recimbrado forjado 2)
Tabla 2.18	Distribución de cargas en puntales y forjados (Hormigonado forjado 3)
Tabla 2.19	Distribución de cargas en puntales y forjados (Descimbrado forjados 3 y 2):
Tabla 2.20	Coefficientes de carga en puntales y forjados medidos por Fang et al. (2001)
Tabla 2.21	Comparación entre las medidas experimentales de Puente et al. con diferentes métodos de estimación de cargas
Tabla 2.22	Relación de resistencias en función de la resistencia a compresión del hormigón (Considerando la relación pésima, que se obtiene para el hormigón de menor resistencia para edificación según la EHE, $f_{ck} = 25$ MPa.)
Tabla 2.23	Criterios para establecer plazos de descimbrado propuestos por Mari
Tabla 2.24	Relación $f_{ckt}(f_{ck})$ para diversos tipos de cementos
Tabla 2.25	Periodos mínimos de desencofrado y descimbrado de elementos de hormigón armado según la EHE.
Tabla 2.26	Periodos mínimos de descimbrado, recomendados por el Código modelo
Tabla 3.1	Coefficientes parciales de seguridad de los materiales

Tabla 3.2	Cargas estimadas aplicando el método simplificado
Tabla 3.3	Cargas estimadas aplicando coeficientes de Moragues et al. (1996)
Tabla 3.4	Características geométricas del puntal empleado en el estudio experimental
Tabla 3.5	Resistencia del puntal según la atura de uso
Tabla 3.6	Características de las bandas extensométricas
Tabla 3.7	Plan de ensayos de laboratorio losa de cimentación
Tabla 3.8	Plan de ensayos de laboratorio primer forjado
Tabla 3.9	Plan de ensayos de laboratorio segundo forjado
Tabla 3.10	Plan de ensayos de laboratorio tercer forjado
Tabla 4.1	Resumen medición instantánea
Tabla 4.2	Resumen medición continua
Tabla 4.3	Variación de carga respecto a la variación máxima de temperatura entre dos operaciones constructivas en los puntales de los forjados 1, 2 y 3
Tabla 5.1	Características geométricas y mecánicas de los puntales considerados en el modelo
Tabla 5.2	Características geométricas y mecánicas de los tableros de encofrado considerados en el modelo
Tabla 5.3	Características geométricas y mecánicas de las sopandas consideradas en el modelo
Tabla 5.4	Comparación entre las medidas experimentales y los resultados del modelo numérico
Tabla 6.1	Parámetros del forjado para el método simplificado de Duan y Chen (1995)
Tabla 6.2	Parámetros de los puntales para el método simplificado de Duan y Chen (1995)
Tabla 6.3	Parámetros del forjado para el método simplificado de Fang et al. (2001)
Tabla 6.4	Parámetros de los puntales para el método simplificado de Fang et al. (2001)
Tabla 6.5	Parámetros del forjado para el método simplificado de Beeby (2001)
Tabla 6.6	Parámetros de los puntales para el método simplificado de Beeby (2001)
Tabla 6.7	Coefficientes de carga media y máxima en puntales obtenidos a partir de los métodos simplificados
Tabla 6.8	Coefficientes de carga en forjados obtenidos a partir de los métodos simplificados
Tabla 6.9	Comparación de coeficientes de carga media entre el método simplificado de Duan y Chen con las medidas experimentales y con los resultados del modelo de EF
Tabla 6.10	Comparación de coeficientes de carga media entre el método simplificado de Fang et al. con las medidas experimentales y con los resultados del modelo de EF
Tabla 6.11	Comparación de coeficientes de carga media entre el método simplificado de Beeby con las medidas experimentales y con los resultados del modelo de EF



## NOTACIÓN

$A$	Área de todos los puntales (según Duan y Chen 1995)
$A$	Constante denominada factor de frecuencia
$A_{Cimbrado}$	Sumatoria del área de los puntales en la fase de cimbrado
$A_{Clareado}$	Sumatoria del área de los puntales en la fase de clareado
$A_{shore,i}$	Área de la sección transversal de los puntales (según Fang et al. 2001)
$A_t$	Área tributaria del puntal considerado
$A_{total}$	Área del forjado instrumentada
$C_{Beeby}$	Coefficiente de carga media método de Beeby
$C_{D\&C}$	Coefficiente de carga media método de Duan y Chen
$C_{Fang}$	Coefficiente de carga media método de Fang et al.
$C_{MEF}$	Coefficiente de carga obtenido en el modelo de elementos finitos
$C_{exp}$	Coefficiente de carga media, medido experimentalmente
$C_f$	Coefficiente de carga en forjados que resulta de la relación entre la carga media del forjado y el peso propio del forjado ( $Q_f / W_f$ )
$C_{f,max,CCD}$	Coefficiente de carga máximo en forjados para un proceso de cimbrado, clareado y descimbrado
$C_{f,max,CD}$	Coefficiente de carga máximo en forjados para un proceso de cimbrado y descimbrado
$C_{p,max}$	Coefficiente de carga máxima en puntales
$C_p$	Coefficiente de carga en puntales que resulta de la relación entre la carga media en puntales y el peso propio del forjado ( $Q_p / W_f$ ).
$C_t$	Carga actuante calculada para el forjado durante el proceso constructivo
$D_L$	Sobrecargas
$D_s$	Cargas muertas
$d$	Días
$E$	Energía de activación
$E_{ci}$	Módulo de elasticidad del hormigón del forjado $i$ (según Fang et al. 2001)
$E_j$	Módulo de elasticidad del hormigón del forjado $j$ (según Duan y Chen 1995)
$E_{sh}$	Módulo de elasticidad de los puntales (según Duan y Chen 1995)

$E_{shore,i}$	Módulo de elasticidad de los puntales ubicados en el forjado $i$ (según Fang et al. 2001)
$F$	Incrementos de carga en puntales (según Duan y Chen 1995)
$f'_{ckt}$	Resistencia a tracción indirecta obtenida en el ensayo brasileño
$f_{c,28}$	Resistencia a compresión del hormigón a 28 días
$f_{c,j}$	Resistencia a compresión del hormigón a $j$ días
$f_{ck}$	Resistencia característica del hormigón a compresión
$f_{ckt,28}$	Resistencia a tracción pura del hormigón a 28 días
$f_{ckt,j}$	Resistencia a tracción pura del hormigón a una edad de $j$ días
$f_{cm,28}$	Resistencia media a compresión del hormigón a 28 días
$f_{cm,j}$	Resistencia media a compresión del hormigón a una edad de $j$ días
$H$	Altura del puntal (según Duan y Chen 1995)
$I$	Momento de inercia suponiendo un ancho unitario (según Duan y Chen 1995)
$I_i$	Momento de inercia de la franja de forjado $i$ (según Fang et al. 2001)
$i$	Número del forjado considerado (según Fang et al. 2001)
$j$	Número del forjado considerado (según Duan y Chen 1995)
$j$	Tiempo equivalente (según Freiesleben Hansen y Pedersen 1977)
$K$	Deformación del elemento estructural bajo la acción de una carga unitaria (según Duan y Chen 1995)
$K_{shore,i}$	Rigidez del sistema de cimbrado ubicado en el forjado $i$ (según Fang et al. 2001)
$K_{slab,i}$	Rigidez del forjado $i$ (según Fang et al. 2001)
$k$	Constante de velocidad
$L$	Luz del vano más largo del forjado (según Duan y Chen 1995)
$L_{shore,i}$	Longitud de los puntales (según Fang et al. 2001)
$L_{slab}$	Luz del forjado (según Fang et al. 2001)
$L_{slab}$	Luz del forjado (según Fang et al. 2001)
$m_{i,1}$	Relación de carga soportada por el forjado del nivel $i$ y la carga soportada por el primer forjado (según Fang et al. 2001)
$n$	Número de plantas consecutivas cimbradas
$P$	Peso propio del forjado recién hormigonado (según Duan y Chen 1995)
$P'_D$	Carga de cálculo actuante en el momento de descimbrado
$P_D$	Carga de cálculo considerada en proyecto
$P_i$	Carga instantánea en el puntal “ $i$ ”
$P_{max,MEF}$	Axil del puntal más cargado en el modelo de elementos finitos

$P_{max,exp}$	Axil del puntal más cargado medida experimentalmente
$P_{max,p+}$	Carga máxima del puntal más cargado en el periodo considerado
$P_{max}$	Axil del puntal más cargado
$P_{max,CCD}$	Axil del puntal más cargado en un proceso de CCD
$P_{max,CD}$	Axil del puntal más cargado en un proceso de CD
$p$	Carga total característica del proyecto
$Q_f$	Carga media en el forjado ( $W_f - Q_p$ )
$Q_p$	Carga media en puntales
$q$	Peso propio del forjado (según Grundy y Kabaila 1963)
$q$	Peso propio del forjado superior (según Fang et al. 2001)
$\overline{q_{p+}}$	Carga media a lo largo del periodo de tiempo considerado, del puntal más cargado por unidad de superficie
$q_i$	Carga soportada por el forjado $i$ (según Fang et al. 2001)
$q_{max,p+}$	Carga máxima del puntal más cargado por unidad de superficie
$q_{max}$	Axil del puntal más cargado por unidad de superficie ( $P_{max} / A_t$ )
$q_{med,MEF}$	Carga media en puntales por unidad de superficie en el modelo de elementos finitos
$q_{med,exp}$	Carga media en puntales por unidad de superficie medida experimentalmente
$q_{med}$	Carga media en puntales por unidad de superficie que resulta de la relación entre la sumatoria de las cargas en puntales y el área del forjado instrumentada ( $\sum P_i / A_{total}$ )
$q_{med,max,CCD}$	Mayor carga media en puntales por unidad de superficie para un proceso de CCD
$q_{med,max,CD}$	Mayor carga media en puntales por unidad de superficie para un proceso de CD
$q_{min,p+}$	Carga mínima del puntal más cargado por unidad de superficie
$R$	Constante de los gases perfectos
$R_n$	Resistencia nominal del hormigón del forjado
$S_b$	Rigidez de los puntales (según Beeby 2001)
$S_s$	Rigideces del forjado considerando su variación con el tiempo (según Beeby 2001)
$s$	Número de puntales instalados bajo el vano considerado (según Fang et al. 2001)
$s$	Coefficiente que depende de la velocidad de endurecimiento del cemento
$T$	Temperatura ambiente en el momento de ejecución de la operación constructiva
$\bar{T}$	Temperatura media ambiente entre dos operaciones constructivas consecutivas
$T_R$	Temperatura de referencia

$U_n$	Resistencia de diseño de una losa de hormigón a edades tempranas
$u_{i,j}$	Coefficiente que relaciona la rigidez del forjado $i$ con la rigidez de los puntales (según Fang et al. 2001)
$v_{i,j}$	Coefficiente que relaciona la rigidez de dos forjados consecutivos (según Fang et al. 2001)
$W_f$	Peso propio del forjado del estudio experimental. Valor teórico estimado en 5.64 kN/m <sup>2</sup>
$w_{b1}$	Carga en los puntales de la planta inferior cimbrada (según Beeby 2001)
$w_p$	Carga en los puntales que soportan el encofrado (según Beeby 2001)
$\alpha$	Ratio de cargas entre dos forjados consecutivos (según Duan y Chen 1995)
$\alpha$	Relación entre la carga actuante sobre un forjado al descimbrar y la carga total característica de proyecto
$\beta$	Factor reductor de la resistencia del hormigón asociado a una edad temprana
$\beta$	Factor que compara las cargas de construcción y las cargas de cálculo en servicio (según Alvarado et al. 2006)
$\gamma$	Coefficiente que depende de las condiciones de contorno y la relación largo ancho del forjado (según Duan y Chen 1995)
$\gamma'_{fg}$	Coefficiente de mayoración de acciones durante la etapa de construcción
$\gamma_h$	Peso específico del hormigón armado
$\gamma_D$	Coefficiente de mayoración de cargas muertas
$\gamma_G$	Coefficiente de mayoración de acciones permanentes
$\gamma_L$	Coefficiente de mayoración de sobrecargas
$\gamma_Q$	Coefficiente de mayoración de acciones variables
$\gamma_c$	Coefficiente parcial de seguridad del hormigón
$\gamma_{fg}$	Coefficiente de mayoración de acciones
$\gamma_s$	Coefficiente parcial de seguridad del acero
$\lambda_i$	Coefficiente que considera las condiciones de contorno del forjado $i$ y la naturaleza de las cargas (según Fang et al. 2001)
$\rho_i$	Coefficiente que considera las cargas desiguales en los puntales (según Fang et al. 2001)
$\Delta_i$	Deformación del forjado $i$ (según Fang et al. 2001)
$\Delta_j$	Flecha en el centro del forjado $j$ (según Duan y Chen 1995)
$\Delta_{sh,j}$	Deformación media de los puntales ubicados sobre el forjado $j$ (según Duan y Chen 1995)
$\Phi_s$	Coefficiente de reducción de resistencia del hormigón para el estado de servicio
CCD	Cimbrado, clareado y descimbrado

CD	Cimbrado y descimbrado
CRD	Cimbrado, recimbrado y descimbrado
EF	Elemento/s finito/s
EFM	Equivalent frame method
MEF	Método de los elementos finitos
ICITECH	Instituto de Ciencia y Tecnología del hormigón



## **CAPITULO 1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS**

### **1.1. Introducción**

Cada año se construyen miles de metros cuadrados de estructura y forjados de edificios con el sistema de cimbrados sucesivos. Este sistema consiste en apoyar las estructuras auxiliares de apuntalamiento sobre forjados hormigonados recientemente. De este modo, el peso de cada nuevo forjado hormigonado se distribuye, a través de la cimbra, entre varios forjados de las plantas inferiores. Para ello, todos los sistemas de construcción utilizan un procedimiento similar, que consiste en disponer una superficie de encofrado sobre la que se vierte el hormigón del forjado correspondiente. La superficie de encofrado queda apoyada sobre sopandas y puntales metálicos telescópicos.

La mejora de plazos y de economía de los sistemas de construcción descritos se basa, principalmente, en la posibilidad de recuperar la mayor parte de los componentes utilizados en el menor tiempo posible. De este modo, el número total de elementos utilizados (puntales, vigas, metros cuadrados de tablero de encofrado), será el mínimo posible.

La condición para usar el menor número de elementos posible, es poder descimbrar la estructura, o al menos parte de ella, en el menor tiempo posible. Factores como el sistema y proceso de cimbrado empleado, las características de la estructura a construir (materiales y acciones de cálculo), las condiciones ambientales (humedad y temperatura), entre otros, hacen que estimar estos tiempos sea un proceso complejo como ponen de manifiesto dos hechos (Alvarado et al. 2009):

- Las normas y recomendaciones internacionales que abordan su estudio lo hacen de forma muy general y habitualmente con criterios muy conservadores.
- Un porcentaje significativo de los colapsos de edificios se producen durante su cimbrado-descimbrado.

En general las diferentes normativas de carácter nacional e internacional coinciden en los criterios generales sobre cómo y cuándo descimbrar, pero no en las recomendaciones prácticas a la hora de establecer los plazos de descimbrado. Además, en ninguna de éstas se define un método de cálculo que permita determinar cómo se transmiten las cargas entre puntales y forjados durante el proceso constructivo.

La seguridad de la estructura durante el proceso constructivo es el factor más importante a tener en cuenta para establecer los plazos de construcción. Cabe citar que un importante número de publicaciones, p.e., Eldukair y Ayyub (1991), Kaminetzky y Stivaros (1994), Feld y Carper (1997), Epaarachchi et al. (2002), Azkune (2007), coinciden en que una de las etapas más críticas para la seguridad de una estructura es justamente su construcción. Este hecho queda de manifiesto al observar que un gran número de los colapsos de estructuras de edificación se presentan durante el proceso

constructivo (Kaminetzky 1991; Azkune 2007). Por lo tanto, conocer cómo se transmiten las cargas entre los forjados y puntales durante el proceso constructivo resulta ser un aspecto fundamental para garantizar la seguridad de la estructura y del personal que trabaja en la obra.

Considerando las particularidades definidas con anterioridad, son varios los métodos analíticos y experimentales que se han desarrollado durante décadas para la evaluación de las cargas sobre forjados y puntales, dentro de la construcción de un edificio. En el Capítulo 2 se describen con detalle estos métodos. Una de las primeras investigaciones desarrolladas para determinar la carga que soportan los forjados y los puntales durante el proceso constructivo, fue la publicada por Nielsen (1952). Grundy y Kabaila (1963) desarrollaron un método simplificado de muy fácil aplicación basado en las hipótesis de considerar que: la rigidez de los puntales es infinita con respecto a la de los forjados, todos los forjados tienen la misma rigidez, y la cimentación es infinitamente rígida.

Publicaciones posteriores, p.e., Duan y Chen (1995), Fang et al. (2001), plantean métodos simplificados que a diferencia del método de Grundy y Kabaila consideran a los puntales como elementos con una rigidez finita, y la rigidez del hormigón de los forjados dependiente del tiempo. De igual forma se han planteado modelos numéricos complejos en 2 y 3 dimensiones, buscando representar las diferentes variables que interactúan durante el proceso constructivo (Liu et al. 1985; Stivaros y Halvorsen 1990; Mosallam y Chen 1991; El-Shahhat y Chen 1992; Moragues et al. 1996; Fang et al. 2001; Alvarado 2007). Sin embargo, la validación experimental de estas investigaciones es reducida. Son de resaltar las más recientes investigaciones de Fang et al. (2001) y Azkune (2007), realizadas de modo experimental.

A pesar del amplio número de investigaciones relacionadas con el cimbrado de forjados sucesivos, el clareado ha recibido muy poca atención por parte de la comunidad científica. Aunque en el Capítulo 2 se realiza una descripción detallada de los procesos de cimbrado más comunes en el sector de la edificación actual, cabe aquí resaltar la importancia del clareado en España, debido a su extendido uso. El clareado consiste en la retirada del encofrado y de más del 50 % de los puntales que soportan el forjado pocos días después de su hormigonado. De esta forma se reduce notablemente el material necesario para el encofrado y cimbrado, mejorando notablemente la economía y racionalizando el proceso constructivo. La aplicación de este método encuentra, sin embargo, numerosas resistencias por parte de proyectistas, contratistas y directores de obra. Debido a que al reducir el número de puntales que sustentan el forjado, se supone que la carga se reparte ahora en un menor número de puntales, transmitiendo más carga a los puntales que quedan. Obviamente, esto no es así ya que al reducir la rigidez del apuntalamiento, los forjados pasan a asumir parte de la carga. Pese a la importancia de este hecho, hasta la fecha, sólo Moragues et al. (1992, 1994, 1996) han estudiado el efecto que tiene el clareado en la transmisión de cargas durante la construcción de forjados.

Por otro lado, todos los estudios experimentales relacionados con el tema planteado, se observa que la toma de medidas en una obra real es compleja y sometida a incertidumbres, pues requiere adaptar toda la organización y control que requiere un estudio experimental al ritmo de la obra. Un estudio experimental a escala real, realizado sobre un edificio construido expresamente como “probeta” de ensayo, es el modo ideal de trabajar. Así, el ritmo de la obra es el que se adapta a las exigencias del estudio y no a la inversa. Esta metodología permite aumentar el número y la calidad de variables controladas y estudiar por separado los efectos de cada una de ellas.

Tal y como se evidencia en los párrafos anteriores, actualmente existe la necesidad de estudiar el efecto que un proceso de cimbrado, clareado y descimbrado produce sobre la transmisión de cargas entre forjados y puntales. Con este objeto se planteó la investigación “Estudio experimental y numérico de la construcción de forjados hormigonados in-situ mediante sistemas de cimbrado y descimbrado”, financiada por el Ministerio de Educación y Ciencia de España, dentro del proyecto BIA 2004-02085. Esta investigación se desarrolla en el Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la Universidad Politécnica de Valencia. La presente Tesis Doctoral representa el inicio del desarrollo del proyecto de investigación planteado, buscando hacer un primer acercamiento al efecto que produce el clareado en la transmisión de cargas entre forjados y puntales en la construcción de edificios de plantas sucesivas.

## **1.2. Objetivos**

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral es el estudio del clareado y los efectos que tiene sobre la transmisión de cargas entre forjados y puntales, dentro de la construcción de un edificio donde los forjados son hormigonados in situ.

El objetivo general descrito se desarrolla, de una forma detallada, en los siguientes puntos:

- a. Estudio del estado del arte sobre el apuntalamiento de forjados sucesivos de edificios en altura. En una primera fase se realizará una descripción de los sistemas y procesos de cimbrado empleados en la actualidad. Se analizará cuales son los factores más importantes que intervienen en la transmisión de cargas entre forjados y puntales durante el proceso constructivo, a partir de las diversas investigaciones relacionadas con el tema en cuestión. Además, se efectuará una recopilación de las propuestas para estimar los plazos de descimbrado, partiendo de diversas investigaciones y normas nacionales e internacionales.
- b. Planteamiento y desarrollo de un programa experimental en condiciones controladas, de una estructura cuyo objetivo principal sea medir la transmisión de cargas que se presentan en un proceso constructivo de cimbrado, clareado y descimbrado. En este punto se definirá el proceso constructivo a emplear, estimando los plazos para las diferentes operaciones constructivas. Posteriormente se definirán el número y cantidad de variables a controlar durante el desarrollo experimental, así como la instrumentación de cada una de ellas.
- c. Determinar a partir del análisis de los resultados experimentales, para el proceso constructivo adoptado, cual fue la transmisión de cargas entre forjados y puntales durante la construcción del modelo experimental. Además, se analizará la influencia de cada una de las variables controladas sobre la distribución de cargas entre los forjados y puntales.
- d. Estudio por el método de los elementos finitos. A partir de los resultados experimentales se calibrará un modelo numérico que permita aproximar con un aceptable grado de precisión como se transmiten las cargas entre forjados y puntales durante el proceso constructivo. Una vez planteado el modelo numérico, se realizará un análisis comparativo entre diferentes procesos de cimbrado.
- e. Aplicación y análisis crítico de los métodos simplificados para el cálculo de la transmisión de cargas entre forjados y puntales para un proceso constructivo de cimbrado, clareado y descimbrado.

### **1.3. Contenido**

La presente Tesis Doctoral está estructurada de la siguiente forma:

- Capítulo 1. Introducción y objetivos.
- Capítulo 2. Antecedentes y estado del arte.
- Capítulo 3. Planteamiento del modelo experimental.
- Capítulo 4. Resultados del estudio experimental.
- Capítulo 5. Estudio por el método de los elementos finitos.
- Capítulo 6. Comparación entre los valores experimentales y los resultados teóricos.
- Capítulo 7. Conclusiones y propuesta de nuevas investigaciones.
- Referencias
- Apéndices.

En el Capítulo 1 se justifica la realización de la presente Tesis Doctoral, exponiendo de una forma general la necesidad de estudiar el efecto que el clareado produce en la transmisión de cargas entre forjados y puntales, dentro de un proceso de cimbrado, clareado y descimbrado.

El Capítulo 2 muestra, a partir de una exhaustiva revisión bibliográfica, el estado del arte relativo al tema planteado. En una primera parte se describen los sistemas y procesos de cimbrado de uso común en edificación. Se estudian en detalle las diversas investigaciones de carácter experimental y numérico relativas a la transmisión de cargas entre forjados y puntales durante el proceso constructivo de edificios de forjados sucesivos. Finalmente se detallan los criterios para determinar los plazos de descimbrado, recopilados en distintas normas y propuestas de estimación de diversos autores.

El Capítulo 3 recoge el diseño del programa experimental. En este capítulo se describen las características del modelo experimental y el proceso constructivo adoptado. Además, también se establecen los recursos de instrumentación y registro de datos para el desarrollo de esta fase.

El Capítulo 4 muestra los resultados del estudio experimental. Así, se pretende entender que factores afectan en la transmisión de cargas entre forjados y puntales durante el proceso constructivo.

En el Capítulo 5 se desarrolla un modelo de elementos finitos representando el proceso constructivo del modelo experimental. Este modelo es calibrado a partir de las medidas obtenidas en la fase experimental. Una vez calibrado el modelo se realiza un estudio comparativo entre los procesos constructivos más habituales para la construcción de edificios en altura.

Siendo necesario representar de forma sencilla como se transmiten las cargas entre forjados y puntales durante los procesos constructivos que consideren el clareado, en el Capítulo 6 se evalúan métodos simplificados que permitan considerar un proceso de cimbrado, clareado y descimbrado.

El Capítulo 7 recoge una serie de conclusiones acerca del trabajo desarrollado en la presente Tesis Doctoral, y los nuevos aportes que ésta hace al estudio del tema en cuestión. Además, se plantea la necesidad de continuar con una línea de investigación que complementa el trabajo hasta ahora desarrollado.

Finalmente se recogen varios Apéndices que contienen información que complementa la investigación desarrollada. Estos apéndices profundizan en temas tratados en la Tesis Doctoral, y facilitan el entendimiento de la misma al lector.

## **CAPITULO 2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE**

### **2.1. Introducción**

Durante la construcción de edificios de hormigón armado de plantas sucesivas, es habitual que al hormigonar un forjado éste se apoye en un sistema de cimbrado que a su vez se apoya en forjados inferiores recientemente hormigonados. Las cargas producidas durante este proceso constructivo suelen ser inferiores a las cargas de servicio de los forjados, pero en ocasiones esto no ocurre. Además si añadimos que cuando apoyamos un forjado superior en uno inferior recientemente hormigonado, el hormigón de este último no ha alcanzado los valores característicos de sus propiedades mecánicas, se hace necesario prestar una especial atención a los valores de cargas transmitidos durante la construcción.

Diferentes autores han estudiado la transmisión de cargas durante la construcción de edificios de hormigón armado. Estos buscan representar mediante modelos teóricos la respuesta estructural frente al proceso constructivo, considerando la evolución de la transmisión de cargas sobre el forjado y sobre los puntales, las cargas actuantes, la variación del esquema estructural y la evolución de las propiedades del hormigón.

Sin embargo este acercamiento teórico contrasta con una escasa validación experimental, siendo las medidas en obra el sistema habitual de validación o comprobación de resultados.

En este capítulo se pretende establecer los antecedentes y estado actual de conocimiento que motivan el desarrollo de la presente Tesis Doctoral. En la primera parte se describirán los sistemas y proceso de cimbrado para forjados de edificación. Seguidamente se hace una evaluación profunda de los modelos teóricos existentes para determinar la transmisión de cargas durante los procesos de cimbrado de forjados consecutivos. A continuación se describen mediciones reales durante el cimbrado de edificios. Finalmente se realiza un análisis de la estimación de tiempos de descimbrado a partir de la evolución de las propiedades del hormigón en el tiempo.

### **2.2. Sistemas y procesos de cimbrado para forjados de edificación hormigonados in situ**

Desde el punto de vista constructivo, el hecho de que el hormigón sea un material moldeable impone la necesidad de un encofrado, capaz de soportar el peso y los empujes laterales del hormigón fresco y además una cimbra capaz de sustentar dicho encofrado. Una vez fraguado el hormigón, desaparece la presión hidrostática del mismo sobre el encofrado, pero dado a que el hormigón aun no habrá alcanzado suficiente resistencia, la cimbra deberá mantenerse durante algo más de tiempo.

La cimbra es un elemento estructural que soporta el hormigón mientras éste adquiere características resistentes suficientes para soportar su peso y posibles cargas en situaciones provisionales.

Los sistemas de cimbrado más usados en la construcción de forjados de hormigón in situ en edificación, son los sistemas de puntales y los de mesas. Los sistemas de puntales emplean puntales, sopandas, paneles de madera y frecuentemente cantos reforzados con perfiles conformados de chapa de acero (Fig. 2.1 y 2.2).

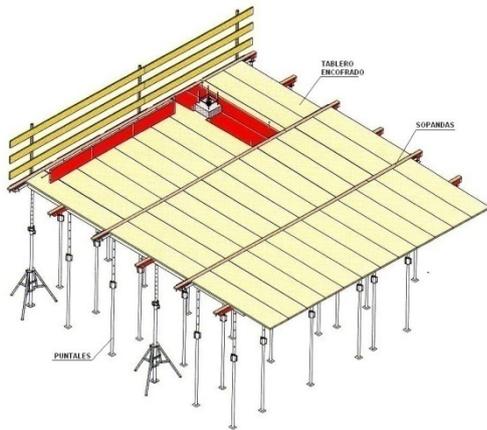


Fig. 2.1 Sistema de losas (ALSINA 2009)

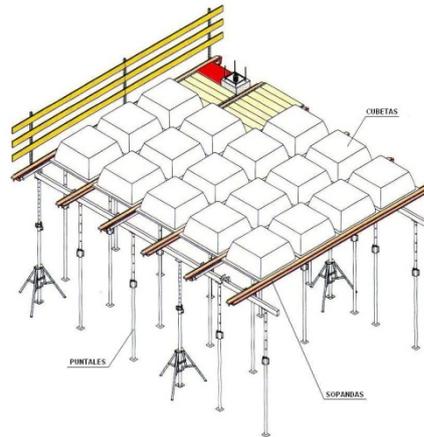


Fig. 2.2 Sistema para reticulares (ALSINA 2009)

Los sistemas de mesas son un conjunto estructural rígidamente unido y compuesto por puntales, cabezales, vigas y tablero (Fig. 2.3 y 2.4).

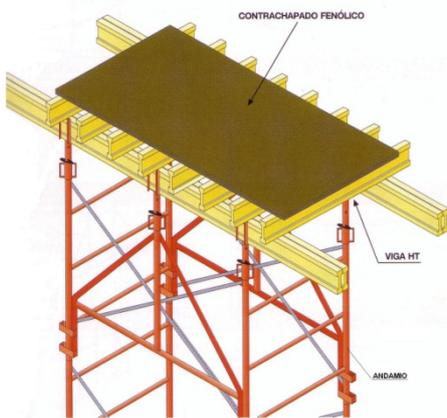


Fig. 2.3 Sistema de puntales con arriostramiento lateral (ALSINA 2009)

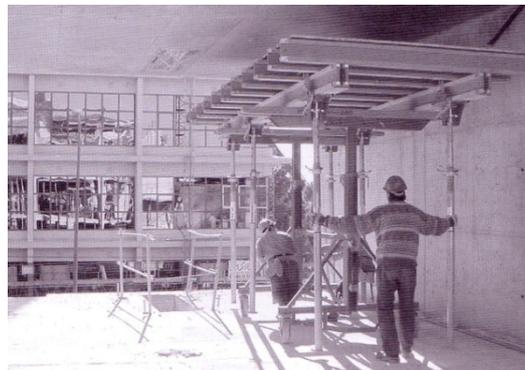


Fig. 2.4 Sistema de mesas

El momento de retirar estos sistemas de cimbrado tiene una especial repercusión durante el proceso constructivo. Por lo tanto los rendimientos en la construcción de forjados de edificación están muy relacionados con un rápido descimbrado. Este factor ha contribuido a la aparición de nuevas técnicas de construcción, como son el recimbrado y el clareado, que permiten optimizar la utilización de los sistemas de cimbrado durante la construcción de forjados sucesivos en altura.

### **2.2.1. Apuntalamiento en un proceso de cimbrado y descimbrado**

En el proceso de cimbrado y descimbrado (en adelante proceso de CD) solo intervienen dos etapas claramente definidas, la colocación de la cimbra donde se vierte el hormigón, y la retirada de esta cimbra. En este proceso existirán cuantos juegos de cimbras sean necesarios por cada planta pudiendo tener dos, tres, o más plantas consecutivas cimbradas. La Figura 2.5 muestra un edificio con tres plantas consecutivas cimbradas.



Fig. 2.5 Proceso de cimbrado y descimbrado

### **2.2.2. Apuntalamiento en un proceso de cimbrado, recimbrado y descimbrado**

En 1967 Taylor desarrolla el proceso de cimbrado, recimbrado y descimbrado (en adelante proceso de CRD). Que consiste en descimbrar determinadas plantas, descargando completamente los puntales correspondientes, redistribuyendo de esta forma la carga entre los forjados. A continuación se apuntala de nuevo, asegurando el contacto entre los puntales y forjados, de forma que los puntales colaboren con los futuros incrementos de carga. De esta forma se consigue que los forjados, a edades cortas, y en el momento de ser recimbrados, deban soportar única y exclusivamente su peso propio. La Figura 2.6 muestra dos forjados consecutivos donde se aprecia claramente que los tableros de encofrado han sido retirados en el proceso de recimbrado.



Fig. 2.6 Proceso de cimbrado, recimbrado, descimbrado

### 2.2.3. Apuntalamiento en un proceso de cimbrado, clareado y descimbrado

El clareado o descimbrado parcial es una operación de uso habitual en España, que consiste en la retirada del encofrado y de más del 50 % de los puntales que soportan el forjado pocos días después de su hormigonado. De esta forma se reduce notablemente el material necesario para el encofrado y cimbrado. Esta técnica mejora notablemente la economía y racionaliza el proceso constructivo. La Figura 2.7 muestra el desarrollo del proceso de cimbrado, clareado y descimbrado (en adelante proceso de CCD) para un ciclo de construcción donde se observa un primer forjado clareado y un segundo forjado completamente cimbrado. En la Figura 2.8 se muestra el mecanismo que permite extraer el tablero de encofrado sin dejar de apuntalar el forjado.



Fig. 2.7 Proceso de cimbrado, clareado y descimbrado

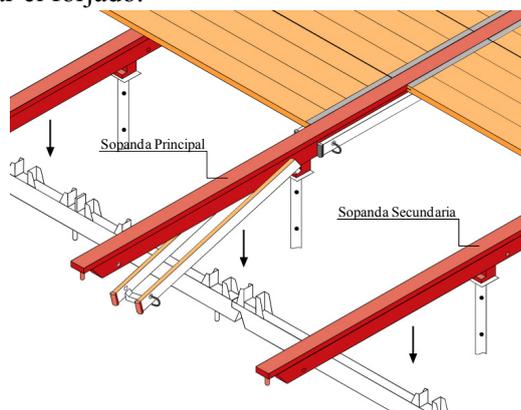


Fig. 2.8 Mecanismo para realizar el clareado (ALSINA 2009)

## 2.3. Transmisión de cargas durante la construcción

En la construcción de edificios en altura, es necesario apoyar la cimbra sobre forjados que no suelen tener la resistencia suficiente para soportar las cargas del forjado superior cuando éste se construye. Así, es necesario cimbrar varias plantas consecutivas, consiguiendo de esta forma que la carga se reparta entre varios forjados.

Según lo descrito, será necesario conocer la distribución de cargas en la estructura, y evaluar si los forjados son capaces de soportar con suficiente seguridad y sin deformaciones excesivas, los esfuerzos a los que va estar sometido durante el proceso de construcción.

Diferentes autores han desarrollado modelos teóricos para estimar la distribución de las cargas en los forjados y puntales originadas durante la construcción. Adicionalmente, algunas investigaciones han comparado los resultados de estos modelos teóricos, con resultados experimentales obtenidos mediante la medición de cargas en edificios reales.

### 2.3.1. Modelos Teóricos

En el presente apartado se describirán algunos de los principales métodos teóricos para el cálculo de la distribución de cargas en forjados y puntales durante la construcción de forjados sucesivos de hormigón in situ. Entre estos modelos encontramos modelos simplificados, y modelos más complejos basados en modelaciones por el método de los elementos finitos en dos y tres dimensiones.

### 2.3.1.1. Método simplificado de Grundy y Kabaila (1963)

Las primeras investigaciones sobre las cargas producidas durante el proceso constructivo fueron desarrolladas por Nielsen (1952). En investigaciones publicadas en 1952, desarrolla un extenso análisis teórico de la interacción entre la cimbra y los forjados que soportan las cargas transmitidas por ésta. En éste análisis se asume que:

- a. Los forjados y puntales tienen un comportamiento elástico.
- b. Los efectos de la retracción y la fluencia del hormigón son despreciables.
- c. Los momentos de torsión y las fuerzas de cortante sobre el encofrado son despreciables.

Considerando la complejidad de este método la aplicación práctica fue reducida.

Cuando Grundy y Kabaila (1963) publicaron el primer método simplificado, se comenzó a conocer, con la aplicación del mismo, cuáles eran las cargas que un proceso evolutivo de construcción podía provocar en la estructura. Este método tomó como base las siguientes hipótesis:

- ✓ Se supone que los forjados inferiores, conectados con puntales, a los que se transmite la carga del nuevo forjado, tienen todos la misma rigidez. Aunque el valor de la rigidez de estos forjados es distinto, la variación del módulo de elasticidad con la edad presenta un crecimiento rápido a edades cortas, permitiendo así considerar que los forjados tienen un valor similar de módulo de elasticidad.
- ✓ La rigidez de los puntales se considera infinita con respecto a la flexibilidad de los forjados.
- ✓ Los puntales de la planta baja descansan sobre un suelo infinitamente rígido.
- ✓ Los efectos de retracción y fluencia pueden ser despreciados.
- ✓ Las cargas de los puntales se asumen a cargas uniformemente repartidas sobre los forjados.

En el proceso de cimbrado y descimbrado se presentan dos etapas a considerar, la primera corresponde a la fase de hormigonado del último forjado y la segunda correspondería a descimbrar el forjado inferior, en la fig. 2.9 se muestra para un número de plantas cimbradas  $n = 3$  las dos etapas.

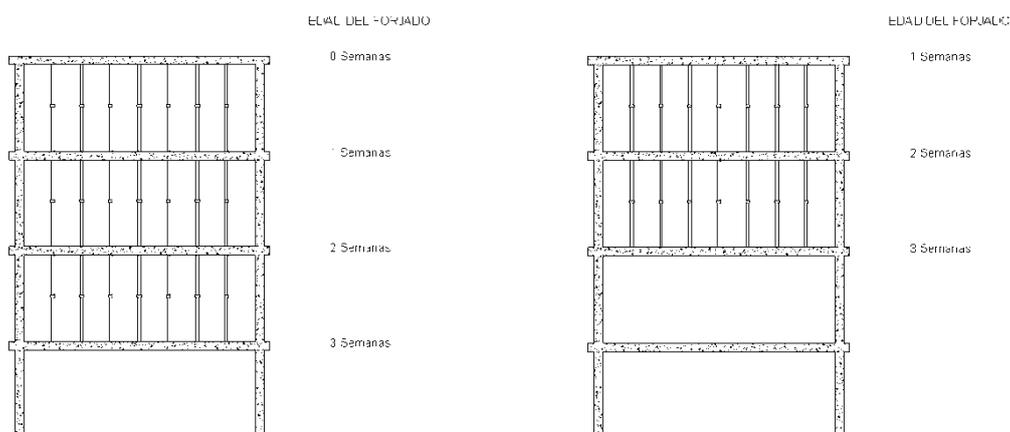


Fig. 2.9 Operaciones de cimbrado y descimbrado  $n=3$

En la primera etapa correspondiente al cimbrado, si hay  $n$  plantas cimbradas, cuando se hormigona el último forjado, su peso propio  $q$  ( $\text{kN/m}^2$ ) se reparte entre los  $n$  forjados inferiores, correspondiendo a cada uno de ellos una carga de:

$$\frac{q}{n} \text{ kN/m}^2 \quad (2.1)$$

En la segunda etapa, al descimbrar la planta inferior, la diferencia entre la carga total  $q_1$  ( $\text{kN/m}^2$ ), que recibía, y su peso propio (incluido en éste, el peso del sistema de encofrado y la posible sobrecarga de construcción)  $q$  ( $\text{kN/m}^2$ ), se reparte entre los  $n$  forjados superiores correspondiendo a cada uno de ellos:

$$\frac{q_1 - q}{n} \text{ kN/m}^2 \quad (2.2)$$

De esta forma, se obtienen coeficientes de carga, que se definen como la relación entre la carga de construcción y el peso propio del forjado. Usando estos coeficientes se pueden determinar las cargas actuantes en los forjados y puntales en las etapas de (a) cimbrado y (b) descimbrado. En las Figuras 2.10 y 2.11 para 2 y 3 juegos de puntales respectivamente se muestran los coeficientes de carga, considerando un ciclo de construcción de  $d$  días por planta y  $d_1$  días para el descimbrado de una planta, y el montaje de puntales y sopandas a la nueva planta superior.

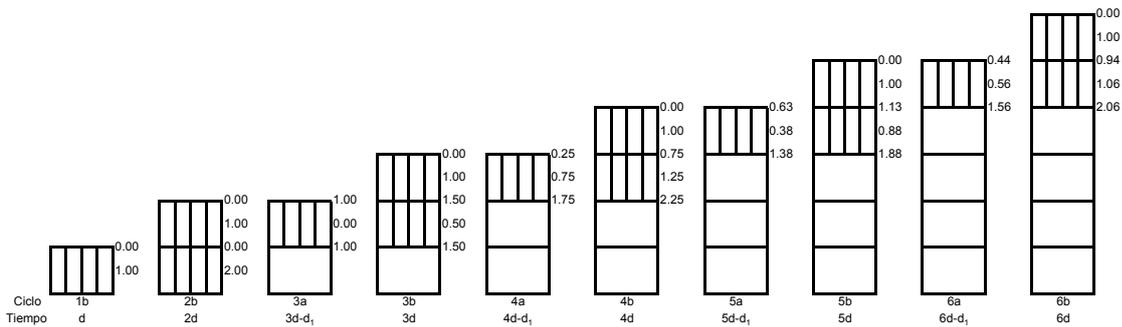


Fig. 2.10 Coeficientes de carga para puntales y forjados  $n=2$

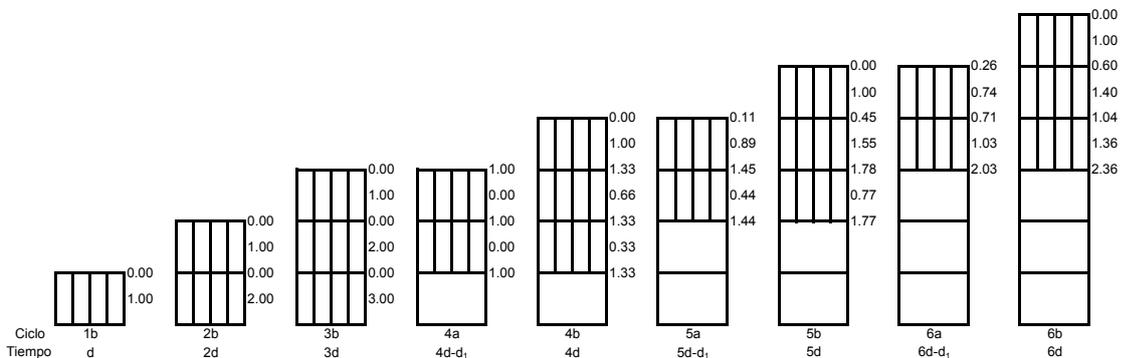


Fig. 2.11 Coeficientes de carga para puntales y forjados  $n=3$

La Figura 2.12 muestra para  $n = 3$ , los coeficientes de cimbrado y descimbrado, determinados por Grundy y Kabaila (1963), considerando que la carga no se reparte por igual entre los forjados colaborantes, sino haciéndolo en proporción a sus rigideces y adoptando un ciclo de construcción de una semana por planta ( $d = 7$  y  $d_l = 2$  días). Se supone que la situación de los forjados corresponde a no fisuración o fisuración reducida, con lo cual equivale a hacer el reparto de las cargas en proporción a los valores del módulo de elasticidad del hormigón a las distintas edades.

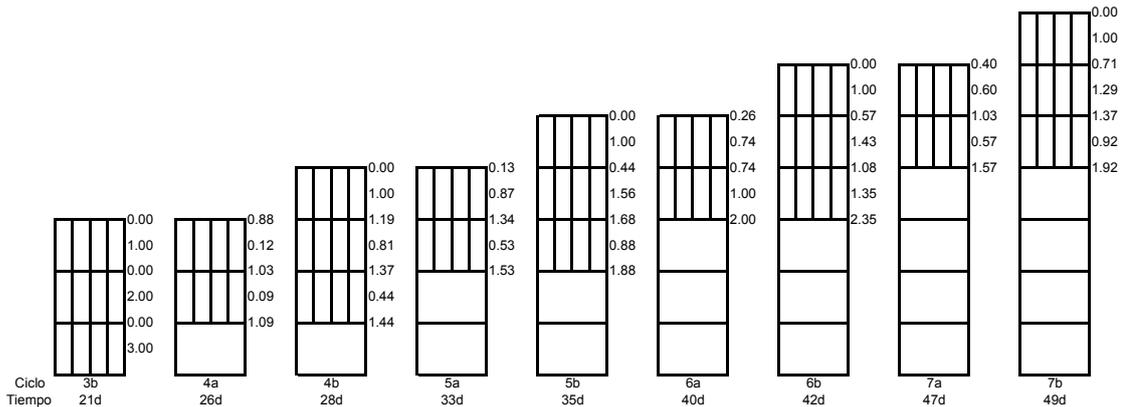


Fig. 2.12 Coeficientes de carga para puntales y forjados considerando la variación del módulo de elasticidad  $n=3$

Comparando los coeficientes de carga de las Figuras 2.11 y 2.12, se puede considerar que la variación del módulo de elasticidad tiene una influencia despreciable en el reparto de cargas en los procesos de cimbrado y descimbrado, según Grundy y Kabaila.

Tras la aparición del método simplificado de Grundy y Kabaila (1963), diversos autores han intentado analizar la influencia que diferentes variables pueden tener sobre los resultados de este sencillo método. Autores como Blakey y Beresford (1965) han evaluado otros condicionantes que intervienen en este proceso, considerando la influencia que puede tener el uso de diferentes sistemas de cimbrado y variaciones en los ciclos de construcción. Estos autores proponen algunos métodos de construcción, consiguiendo mejorar las condiciones resistentes de los forjados más jóvenes al alargar los ciclos de construcción.

### 2.3.1.2. Método simplificado para recimbrado Taylor (1967)

Taylor (1967), después de realizar un profundo estudio sobre la influencia que tiene apoyar puntales sobre forjados recién hormigonados determinó que los coeficientes del método simplificado de Grundy y Kabaila podrían ser reducidos. Así es como surge la técnica del recimbrado, la cual permite reducir los coeficientes de carga que se producen mediante un apuntalamiento normal, debido a que se redistribuyen las cargas de los forjados recientemente hormigonados.

Tal y como se ha indicado en el apartado 2.2.2, el proceso de recimbrado consiste en descimbrar determinadas plantas, descargando completamente los puntales correspondientes, para redistribuir la carga entre los forjados, y, a continuación, apuntalar de nuevo, asegurando el contacto entre los puntales y forjados, de forma que los puntales colaboren con los futuros incrementos de carga. De esta

forma se consigue que los forjados a edades cortas, en el momento de ser recimbrados, deban soportar única y exclusivamente su peso propio.

La aplicación de esta técnica implica un especial control de las deformaciones que se presenten en los forjados, debido a que el hormigón en el momento del recimbrado no ha alcanzado su resistencia característica, lo que se traduce en valores reducidos de módulo de elasticidad. Por lo tanto, esta técnica requiere un control riguroso para que el efecto obtenido sea el deseado.

Los ciclos de operación del proceso de recimbrado constan de 3 pasos esencialmente:

- ✓ (a) Se recimbra la planta más baja cimbrada.
- ✓ (a') Se desmonta el apuntalamiento de la planta más baja recimbrada y se traslada a su nuevo emplazamiento en la nueva planta de construcción.
- ✓ (b) Se hormigona la última planta cimbrada.

La Figura 2.13 muestra los coeficientes de carga determinados para un proceso de recimbrado, para dos juegos de puntales.

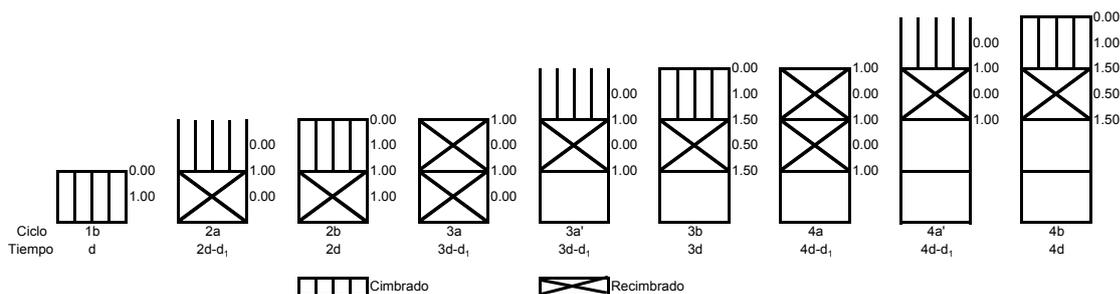


Fig. 2.13 Coeficientes de carga para puntales y forjados  $n=2$  (Recimbrado)

Algunos autores como Agarwal y Gardner (1974), definen la técnica del recimbrado como un procedimiento de difícil control, y que requiere una estricta supervisión, algo inusual en algunas obras, además del inconveniente de someter hormigones muy jóvenes a esfuerzos que pueden llegar a traducirse en deformaciones permanentes excesivas en la estructura.

### 2.3.1.3. Modelo de Liu et al. (1985, 1986)

Liu et al. (1985,1986), desarrollan un modelo conocido como el método refinado, en dos y tres dimensiones, planteando hipótesis diferentes a las planteadas por Grundy y Kabaila (1963). En el análisis se consideran las siguientes hipótesis:

- ✓ Se asume un comportamiento elástico de los forjados de hormigón armado, considerando la variación de rigidez con respecto al tiempo.
- ✓ El peso y geometría en todos los forjados se asumen como similares.

- ✓ Los puntales en los procesos de cimbrado y recimbrado, son asimilados como soportes elásticos con igual rigidez axial.
- ✓ Se consideran cuatro tipos de condiciones de contorno del forjado, la primera considerando al forjado continuo en todas sus direcciones, la segunda y la tercera considerándolo continuo en una dirección y extremo en la otra dirección, y la cuarta considerando un forjado aislado.
- ✓ La cimentación se considera como infinitamente rígida e indeformable.

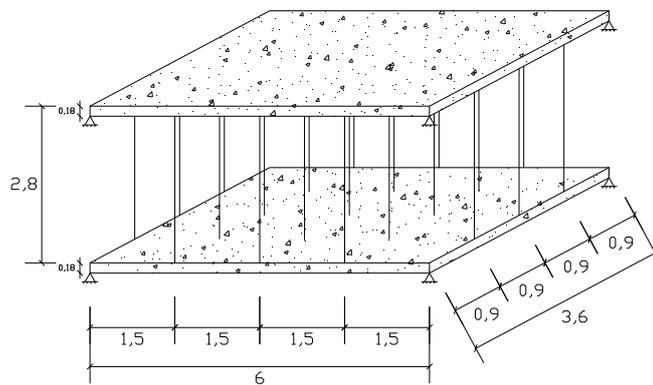


Fig. 2.14 Modelo estructural Modelo de Liu et al. (1985)

El modelo (en tres dimensiones) desarrollado por Liu, et al. (1985) es idéntico al mostrado en la Figura 2.14. La resistencia característica del hormigón considerado en el análisis es de 41 MPa, con un módulo de elasticidad de 35 GPa. Los puntales planteados son de madera con una sección rectangular de 50 x 100 mm, considerando como valores de resistencia a compresión de la madera y módulo elástico de 5.6 MPa y 7.75 GPa, respectivamente. El ciclo constructivo considerado es de dos plantas cimbradas y una recimbrada, con un ritmo de ejecución de un forjado por semana.

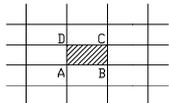
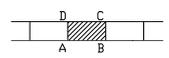
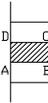
En la Tabla 2.1, se muestran los coeficientes de carga máxima en puntales obtenidos por Liu et al. (1985) en modelos de 2 y 3 dimensiones, comparados con los coeficientes del método simplificado de Grundy y Kabaila (1963), para un proceso de construcción con dos plantas cimbradas y una recimbrada, hormigonando una planta por semana.

Adicionalmente Liu et al. (1985), consideraron nuevas hipótesis (no incluidas en su propuesta) como la influencia de la rigidez de la cimentación, la deformabilidad de los pilares y la relación largo-ancho del forjado.

En cuanto a la influencia de la rigidez de la cimentación, se consideró como superficie de cimentación una losa con iguales dimensiones que el forjado, al cual se le variaba su rigidez  $G$ . Los resultados obtenidos con respecto a la fase de construcción con dos forjados apuntalados apoyados en la cimentación, en donde se presenta la carga máxima en puntales, para un proceso de construcción de dos plantas cimbradas y 1 recimbrada, muestran un pequeño aumento de la carga máxima en puntales

cuando se aumenta la rigidez de la cimentación, como lo muestra la Figura 2.15. Se concluye con ello la escasa influencia de la rigidez del cimient en las cargas en los puntales.

Tabla 2.1 Coeficientes máximos en puntales modelos Liu, Chen y Bowman (1985)

No.	Condiciones de Contorno del Forjado	Carga Máxima en Puntales			$M_{3D}/M_s$
		Método Grundy y Kabaila ( $M_s$ )	Método 2D ( $M_{2D}$ )	Método 3D ( $M_{3D}$ )	
1		2.00	1.83	1.86	0.93
2		2.00	1.83	1.97	0.99
3		2.00	2.07	2.06	1.03
4		2.00	2.07	2.07	1.04

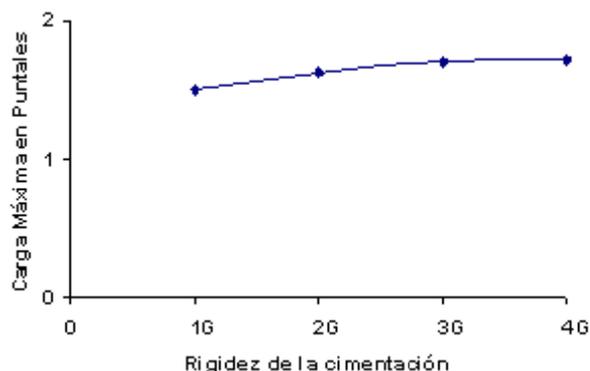


Fig. 2.15 Influencia de la rigidez de la cimentación

En lo referente a la deformación de los pilares, se encontró que su influencia era despreciable en el momento de determinar la distribución de cargas en los puntales, lo mismo ocurrió con la relación largo-ancho del forjado, donde se encontraron diferencias alrededor de un 3% en la carga máxima en puntales.

Finalmente Liu et al. (1985, 1986) concluyen que el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963) es adecuado para predecir las cargas en el proceso de construcción, aunque consideran la posibilidad de corregir los coeficientes de carga mediante el uso de un coeficiente (1.05-1.10), que permita contemplar la influencia de aspectos no considerados en dicho método.

#### 2.3.1.4. Modelo EFM de Stivaros y Halvorsen (1990)

El uso del *Equivalent Frame Method* (EFM) es propuesto por Stivaros y Halvorsen (1990) para el cálculo de la transmisión de cargas entre forjados y puntales con el fin de mejorar los métodos

anteriormente descritos. El EFM fue propuesto en 1970 en la revisión del código de la edificación de la ACI Committee 311, como un método de diseño de estructuras de hormigón.

Stivaros y Halvorsen proponen utilizar el EFM para el diseño de procesos constructivos de edificios de hormigón. El EFM propone un modelo en dos dimensiones de la estructura considerando las siguientes hipótesis:

- ✓ Se consideran los puntales como apoyos elásticos con un valor de rigidez igual a la rigidez total de los puntales correspondientes.
- ✓ Se asume que el nudo entre la losa y el puntal es una articulación.
- ✓ Se considera la cimentación como infinitamente rígida.
- ✓ Se consideran dos tipos de condiciones de contorno, la primera correspondiente a un vano aislado y la segunda a un conjunto de tres vanos.

El modelo representa un edificio en dos dimensiones considerando a los puntales como elementos verticales tipo barra, con una rigidez equivalente a la rigidez total de los puntales ubicados en la fila. Las losas son representadas con elementos tipo viga, con un ancho igual a la luz entre pilares y canto igual al canto real de la losa. Los pilares se consideran como elementos tipo viga con una sección igual a la sección real.

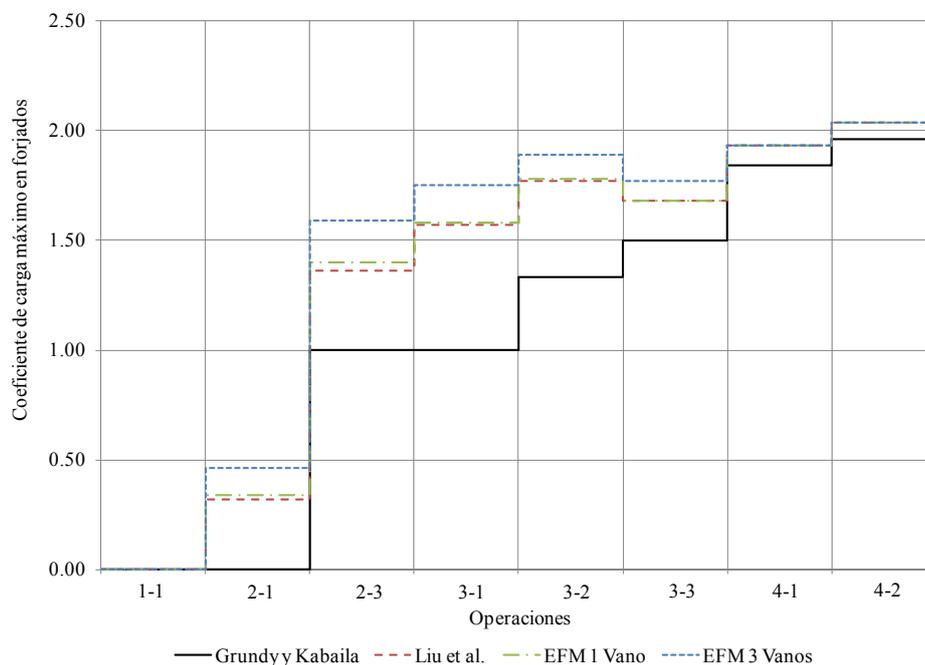


Fig. 2.16 Resultados del modelo EMF comparado con distintos modelos numéricos

La Figura 2.16 muestra las cargas máximas en los forjados, comparando los resultados del EFM con los resultados obtenidos con el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963) y con el método de Liu et al. (1985). En la gráfica las operaciones constructivas se expresan mediante dos números. El

primero hace referencia al último forjado hormigonado. El segundo número se refiere a la fase constructiva:

- ✓ (1) se refiere al hormigonado del nivel superior.
- ✓ (2) se refiere a la retirada del reapuntamiento del nivel inferior.
- ✓ (3) se refiere a la retirada del apuntalamiento del nivel inferior.

En la Figura 2.16 se observa que los tres métodos coinciden en predecir la carga máxima correctamente (operación 4-2), así como el lugar y el paso constructivo en el que ésta se presenta. Además la diferencia de resultados está por debajo de un 5%. Sin embargo estas diferencias se corresponden a una secuencia determinada de proceso constructivo. Por este motivo Stivaros y Halvorsen (1990) consideraron varias secuencias constructivas cambiando el número de forjados que se encontraban cimbrados y recimbrados. Los resultados de las cargas máximas para diferentes combinaciones constructivas se presentan en las Figuras 2.17 y 2.18.

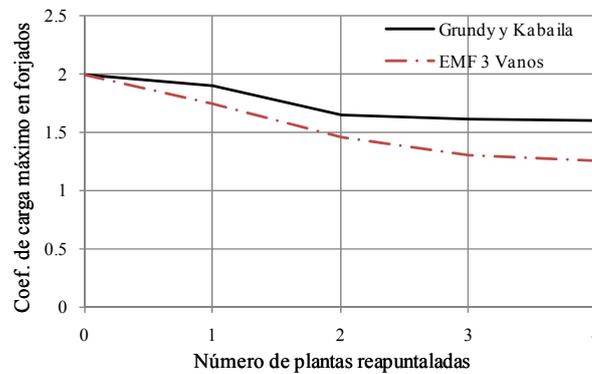


Fig. 2.17 Coeficientes de carga máximos para un forjado cimbrado

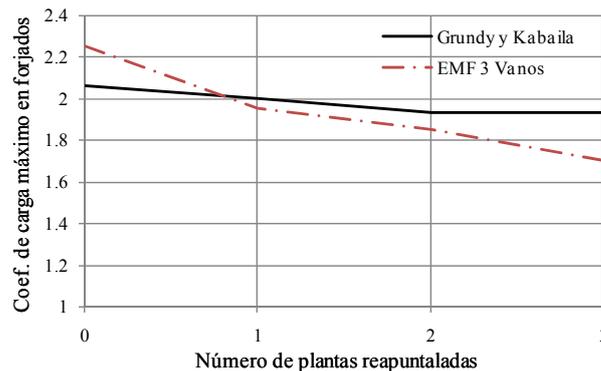


Fig. 2.18 Coeficientes de carga máximos para dos forjados cimbrados

En las Figuras 2.17 y 2.18 se observa que la carga máxima fluctúa dependiendo del esquema constructivo utilizado, siendo en algunos casos la diferencia con las estimaciones del método simplificado de Grundy y Kabaila (1963) mucho mayor al 5%. También se evidencia la necesidad de emplear modelos que consideren varios vanos y no modelos de un único vano que pueden incurrir en errores importantes.

### 2.3.1.5. Modelo de Mosallam y Chen (1991)

Mosallam y Chen (1991) desarrollaron un modelo en dos dimensiones con el fin de determinar la distribución de cargas en forjados durante el proceso de construcción, y compararlas con las obtenidas con los modelos de Liu et al. (1985-1986), y con el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963).

Las hipótesis básicas del modelo de Mosallam y Chen (1991) son:

- ✓ El comportamiento de los forjados y pilares se considera elástico, y su rigidez dependiente del tiempo.
- ✓ Los puntales en los procesos de cimbrado y recimbrado son asimilados como soportes elásticos con una rigidez finita.
- ✓ La rigidez de la cimentación es considerada como correspondiente a la rigidez de una losa de cimentación de iguales características a los forjados.
- ✓ Los pilares inferiores al último forjado a hormigonar tienen una edad de 7 días.
- ✓ La distribución de cargas de construcción en puntales y forjados se considera cambiante durante el periodo de tiempo definido entre el hormigonado de forjados consecutivos.

El modelo en dos dimensiones es igual al modelo empleado por Liu et al. (1985, 1986) descrito anteriormente (Fig. 2.14). La única diferencia se basa en no despreciar la deformación vertical de los pilares, considerándolos como elementos de hormigón con una sección de  $0.50 \times 0.50 \text{ m}^2$ .

Se establecieron dos procedimientos de construcción, el primero consiste en 3 niveles de cimbrado (Caso "A"), y el segundo en dos niveles de cimbrado y uno de recimbrado (Caso "B"). La distribución de cargas en forjados durante el proceso de construcción en relación al peso propio del forjado, se muestra en la Figura 2.19, y en la Figura 2.20 se comparan los resultados correspondientes al forjado más cargado con respecto a los resultados del método simplificado de Grundy y Kabaila (1963).

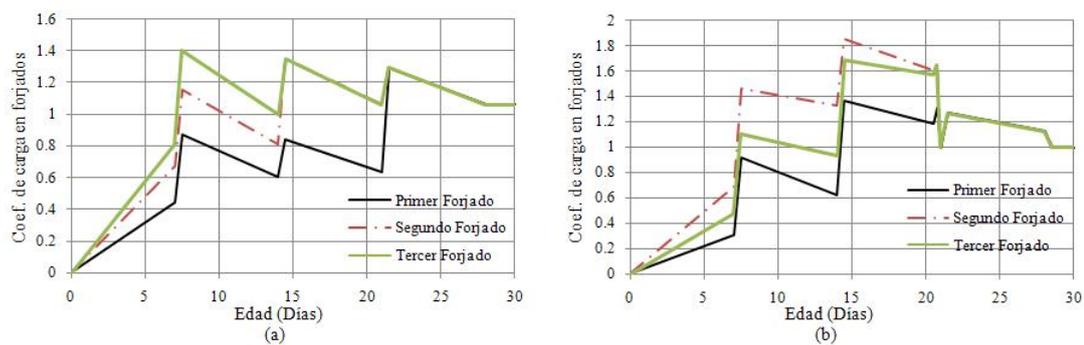


Fig. 2.19 Historial de cargas para los primeros tres forjados (a) Caso "A" (b) Caso "B"

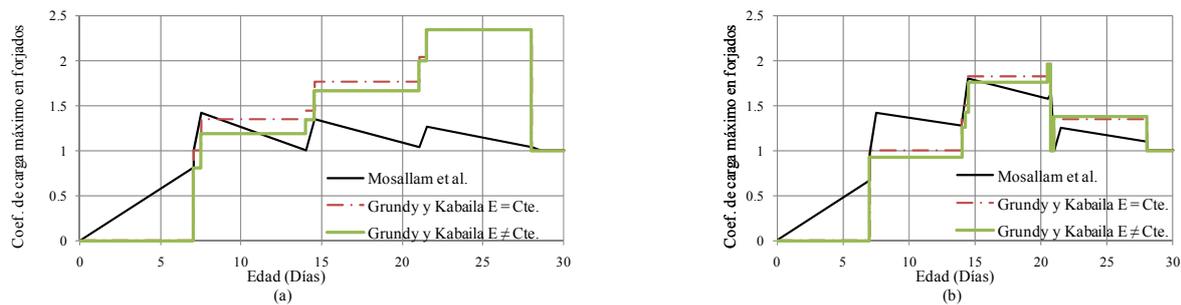


Fig. 2.20 Comparación de resultados entre el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963) y el modelo de Mosallam et al. (1991)

Comparando el método simplificado de Grundy y Kabaila con los resultados obtenidos, se observa que el método de Grundy y Kabaila sobreestima las cargas que se presentan en un proceso de construcción, en relación a los coeficientes obtenidos por el modelo de Mosallam y Chen, tanto para el caso “A” considerando un 66% más de carga en los forjados, como para el caso “B” considerando un 32% más de carga en los forjados. Estas diferencias con el método de Grundy y Kabaila llevaron a los autores, a determinar la influencia que tienen cada una de las hipótesis contempladas en el modelo, en la distribución de cargas en forjados y puntales. A continuación se resume la influencia que cada una de estas hipótesis tiene en la distribución de cargas:

- a. Influencia de la rigidez de la cimentación: En el modelo de Mosallam y Chen se considera que la cimentación tiene una rigidez equivalente a la de un forjado, a diferencia del método de Grundy y Kabaila, que considera a la cimentación como infinitamente rígida e indeformable. Para determinar dicha influencia, se modificó el modelo, considerando una cimentación infinitamente rígida. Los resultados obtenidos mostraron que, con respecto a la distribución de cargas en forjados, no hay ninguna diferencia. Sin embargo, en la distribución de cargas en puntales existe un incremento de carga de aproximadamente un 11%.
- b. Influencia de las condiciones de contorno del forjado: se analizan dos casos extremos, el primero considerando el forjado simplemente apoyado y el segundo como empotrado. Los resultados obtenidos muestran que las condiciones de contorno del forjado tienen muy poca influencia en la distribución de cargas de construcción en los forjados. Sin embargo, en la consideración del forjado simplemente apoyado se sobreestima en un 43% la carga máxima en puntales.
- c. Influencia de la rigidez de los forjados: se observó la pequeña influencia que tiene considerar el módulo de elasticidad del hormigón como variable o constante, en la distribución de cargas de construcción en los forjados (aproximadamente un incremento del 7% para el caso “A” y una disminución del 2% para el caso “B”, en la carga máxima en forjados, y un 6% de disminución en ambos caso de la carga máxima en puntales).
- d. Influencia de la rigidez de los puntales: el modelo de Mosallam y Chen considera que los puntales tienen una rigidez finita, diferente al método simplificado de Grundy y Kabaila que considera los puntales como infinitamente rígidos. Al incrementar la rigidez de los puntales la carga máxima en forjados tiende a disminuir en un 3%, y la carga máxima en puntales tiende a incrementarse en un

98%, para el caso “A”. En el caso “B” se incrementó la carga máxima en forjados y puntales un 7 y un 50% respectivamente.

- e. Influencia de despreciar el cambio en la distribución de cargas durante los ciclos de construcción: El método simplificado de Grundy y Kabaila asume que la distribución de carga de construcción se mantiene constante durante el hormigonado de forjados consecutivos. Esta hipótesis lleva a sobreestimar la carga máxima en forjados en un 43%, y la carga máxima en puntales en un 42% para el caso “A”. Así mismo, para el caso “B” se sobreestima la carga máxima en forjados en un 17%, y la carga máxima en puntales en un 16%.

### 2.3.1.6. Método simplificado Modificado de Mosallam y Chen (1991)

Mosallam y Chen (1991) al ver las diferencias entre los resultados obtenidos del modelo en dos dimensiones (descrito en el apartado anterior) con los resultados del método simplificado de Grundy y Kabaila (1963), desarrollaron el método simplificado modificado de Mosallam y Chen.

Tabla 2.2 Comparación entre los modelos de Grundy y Kabaila (1963) y los modelos de Mosallam y Chen (1991) para el caso de tres plantas cimbradas

Paso	Nivel	Método simplificado de Grundy y Kabaila		Modelo en 2D Mosallam-Chen		Método simplificado de Mosallam y Chen	
		Puntales	Forjado	Puntales	Forjado	Puntales	Forjado
1	1	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
2	2	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
	1	2.00	0.00	1.51	0.86	2.00	0.00
3	3	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
	2	2.00	0.00	1.08	1.15	2.00	0.00
	1	3.00	0.00	1.34	0.85	3.00	0.00
4	3	0.00	1.00	0.08	0.94	0.00	1.00
	2	0.00	1.00	0.06	1.03	0.00	1.00
	1		1.00		1.07		1.00
5	4	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
	3	0.66	1.34	0.70	1.42	0.66	1.34
	2	0.33	1.33	0.32	1.36	0.33	1.33
	1		1.33		1.29		1.33
6	4	0.89	0.11	0.09	0.94	0.00	1.00
	3	0.44	1.45	0.06	1.03	0.00	1.00
	2		1.44		1.07		1.00
	1		1.00		1.00		1.00
7	5	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
	4	1.55	0.45	0.71	1.41	0.66	1.34
	3	0.77	1.78	0.33	1.35	0.33	1.33
	2		1.78		1.28		1.33
8	5	0.74	0.26	0.10	0.93	0.00	1.00
	4	1.03	0.71	0.07	1.02	0.00	1.00
	3		2.03		1.05		1.00
	2		1.00		1.00		1.00
9	6	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
	5	1.40	0.60	0.72	1.40	0.66	1.34
	4	1.36	1.04	0.34	1.34	0.33	1.33
	3		2.36		1.27		1.33
10	6	0.54	0.46	0.11	0.93	0.00	1.00
	5	0.49	1.05	0.08	1.01	0.00	1.00
	4		1.49		1.05		1.00
	3		1.00		1.00		1.00

Dicho método, conocido como el método simplificado modificado de Mosallam y Chen (1991), considera una redistribución de carga y mantiene el resto de suposiciones adoptadas por Grundy y Kabaila (1963). Es decir que la distribución de cargas se calcula dos veces por operación, al inicio y al final de cada paso constructivo, considerando la evolución del módulo de elasticidad del hormigón.

Los coeficientes de carga obtenidos con el método simplificado modificado de Mosallam y Chen (1991) se comparan con los coeficientes del modelo simplificado de Grundy y Kabaila (1963) y con los coeficientes obtenidos en el modelo en dos dimensiones de Mosallam y Chen (1991). Dicha comparación queda incluida en las Tablas 2.2 y 2.3 para los casos de tres plantas cimbradas, y dos plantas cimbradas y una recimbrada respectivamente.

Tabla 2.3 Comparación entre los modelos de Grundy y Kabaila (1963) y los modelos de Mosallam y Chen (1991) para el caso de dos plantas cimbradas y una recimbrada

Paso	Nivel	Método simplificado Grundy y Kabaila		Modelo en 2D Mosallam-Chen		Método simplificado Mosallam y Chen	
		Puntales	Forjado	Puntales	Forjado	Puntales	Forjado
		1	1	1.00	0.00	1.00	0.00
2	2	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
	1	2.00	0.00	1.51	0.86	2.00	0.00
3,4	2	0.00	1.00	0.06	0.97	0.00	1.00
	1	0.00	1.00	0.00	1.07	0.00	1.00
5	3	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
	2	1.00	1.00	0.72	1.41	1.00	1.00
	1	1.00	1.00	0.39	1.32	1.00	1.00
6	3	0.67	0.33	0.62	0.51	0.67	0.33
	2	0.33	1.34	0.29	1.31	0.34	1.33
	1	0.00	1.33	0.00	1.27	0.00	1.34
7,8	3	0.50	0.50	0.50	0.59	0.50	0.50
	2	0.00	1.50	0.00	1.47	0.00	1.50
	1	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
9	4	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
	3	1.17	0.83	1.12	1.10	1.17	0.83
	2	0.34	1.83	0.25	1.80	0.33	1.83
	1	0.00	1.34	0.00	1.22	0.00	1.33
10	4	0.89	0.11	0.62	0.51	0.67	0.33
	3	0.95	0.94	0.75	0.91	0.84	0.83
	2	0.00	1.95	0.00	1.63	0.00	1.84
	1	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00

### 2.3.1.7. Modelo de Moragues et al. (1992, 1994, 1996)

Después de realizar un extenso estudio de la transmisión de cargas de construcción en edificación, Moragues et al. (1992), instrumentaron dos edificios con el objeto de medir las cargas originadas durante el proceso constructivo con los medios habituales en España.

La diferencia encontrada en los valores de carga de construcción medidos en obra, con las cargas estimadas mediante el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963), motivaron al desarrollo de una modelización numérica en dos dimensiones. Las hipótesis contempladas para dicho modelo son las siguientes:

- ✓ Cálculo lineal, en dos dimensiones.
- ✓ Se consideran puntales metálicos de rigidez conocida.

- ✓ No se considera el peso propio de los puntales.
- ✓ La cimentación se considera como infinitamente rígida.
- ✓ Los puntales se consideran apoyados en sus extremos.
- ✓ Los efectos de retracción y fluencia son despreciados.

Adicionalmente se consideraron 4 variaciones:

- ✓ Supuesto básico (Considerando el conjunto de hipótesis antes mencionadas).
- ✓ Variación del módulo de elasticidad del hormigón, con la edad.
- ✓ Clareado.
- ✓ Variación del módulo de elasticidad del hormigón con la edad, y clareado.

El clareado, es un proceso de uso habitual en España, el cual no puede ser considerado como un recimbrado, ya que el forjado no deja de estar apuntalado en el momento de la retirada de los fondos de encofrado, sino apoyado en la mitad de los puntales que se encontraban en el momento del hormigonado.

Se muestran a continuación los resultados y conclusiones obtenidas con las diferentes modelizaciones numéricas realizadas por Moragues et al. (1994, 1996) en forma de coeficientes de carga que se corresponden siempre a tomar como unidad el peso propio del forjado, y se comparan con las mediciones realizadas en obra:

- ✓ Como indica el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963), el forjado más solicitado corresponde a la última planta que fue hormigonada con puntales hasta la cimentación, cuando se tiene sobre él un número de plantas cimbradas igual a los juegos de cimbras que se utilicen. En la Tabla 2.4 se muestran los coeficientes máximos de carga en forjados.

Tabla 2.4 Coeficientes máximos de carga en forjados

N	Hipótesis						
	Método de Grundy y Kabaila	No clareado No E Variable	No Clareado E Variable	Clareado E Variable	No Clareado E Variable	Clareado E Variable	E Benidorm
2	2.25	2.12	2.14	1.77	1.83	-	-
3	2.36	2.18	2.22	1.77	1.81	1.84	1.84

- ✓ Las cargas máximas en puntales aparecen siempre en los que apoyan en la cimentación, cuando tienen todos los juegos de cimbra sobre ellos (Tabla 2.5). Salvando este momento de la obra, las cargas máximas sobre puntales aparecen sobre la última planta que fue cimbrada hasta la cimentación, cuando se hormigona la planta “n” situada sobre ella (Tabla 2.6).

Tabla 2.5 Coeficientes máximos de carga en puntales (Cimentación)

N	Hipótesis						
	Método de Grundy y Kabaila	No clareado No E Variable	No Clareado E Variable	Clareado E Variable	No Clareado E Variable	Clareado E Variable	E Benidorm
2	2	1.54	1.73	2.78	2.96	-	-
3	3	1.85	2.13	3.15	3.35	3.38	3.38

Tabla 2.6 Coeficientes máximos de carga en puntales (Casos Restantes)

N	Método de Grundy y Kabaila	Hipótesis				E	Benidorm
		No clareado No E Variable	No Clareado E Variable	Clareado No E Variable	Clareado Variable		
2	1.12	1.16	2.01	2.15	-	1.25	
3	1.34	1.44	2.49	2.60	2.40	1.55	

Las Figuras 2.21 y 2.22 muestran los coeficientes de carga para cada uno de los pasos constructivos en dos casos. El primero considerando dos plantas cimbradas y el segundo considerando 3 plantas cimbradas, en ambos casos con el paso intermedio del clareado.

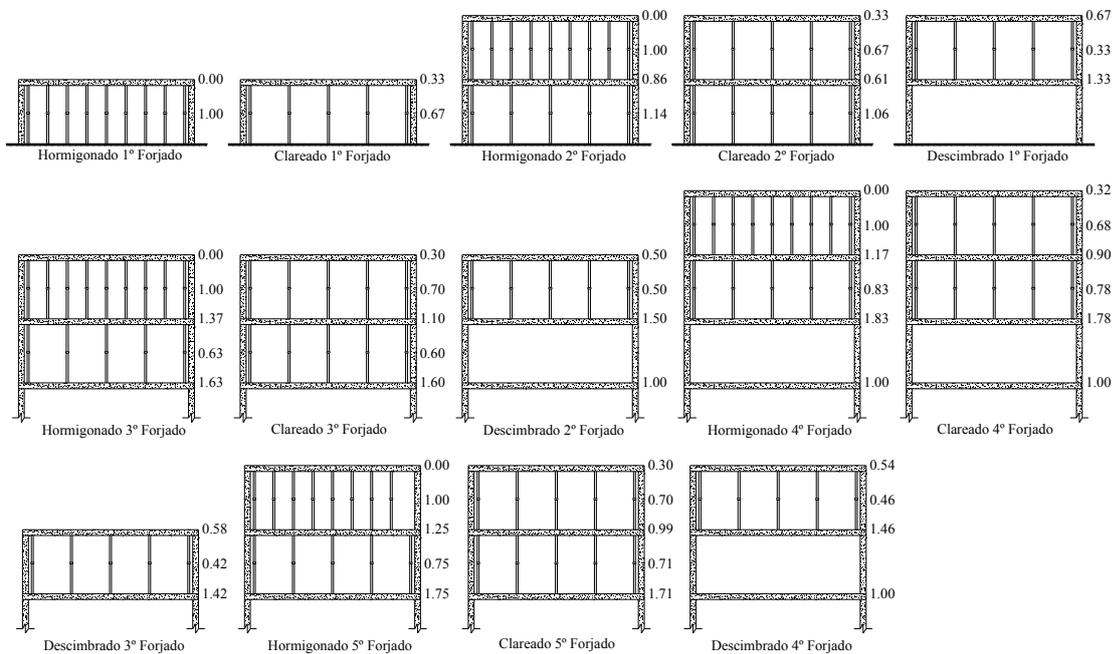


Fig. 2.21 Coeficientes de carga modelo Moragues et al. (1996) para dos plantas cimbradas

Finalmente Moragues (1996) concluye la necesidad de realizar más investigaciones que consideren aspectos como las deformaciones producidas por el proceso constructivo, la posible fisuración del hormigón joven y la influencia que pueden tener las deformaciones de retracción y térmicas durante el proceso constructivo.

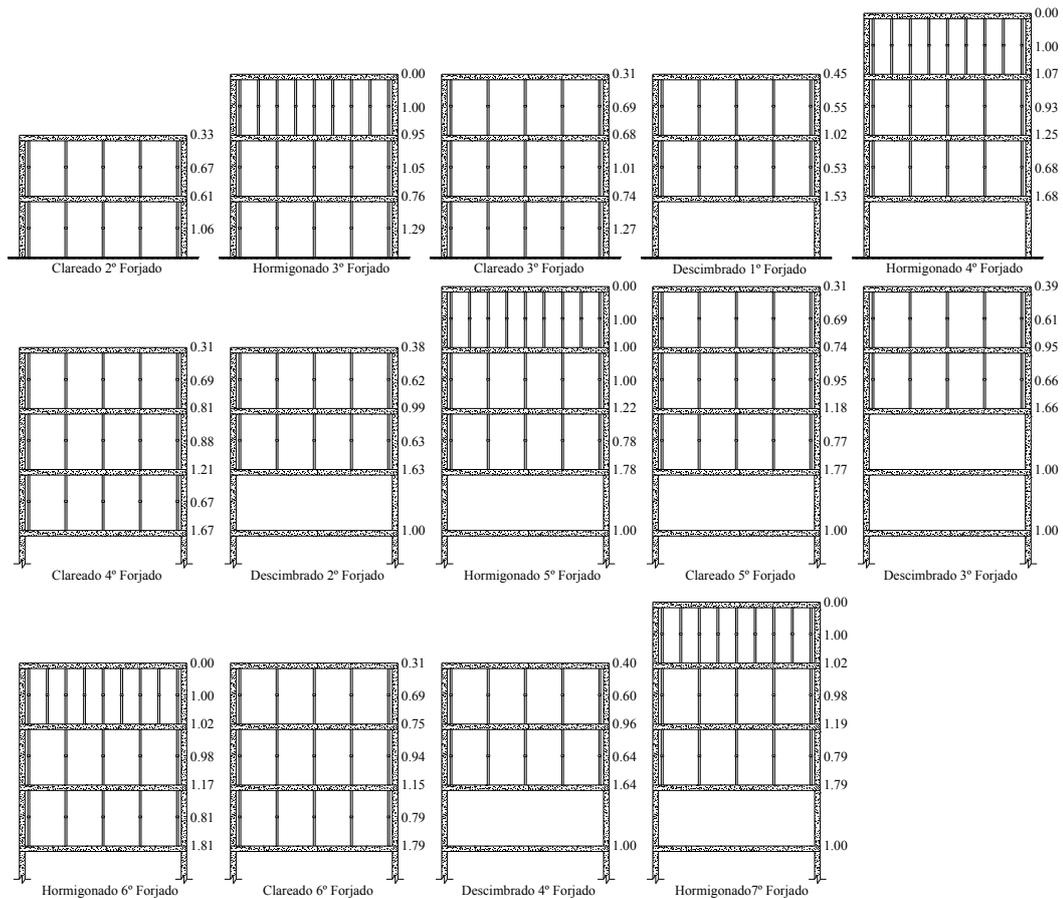


Fig. 2.22 Coeficientes de carga modelo Moragues et al. (1996) para tres plantas cimbradas

### 2.3.1.8. Método Simplificado de Duan y Chen (1995)

El método de Duan y Chen (1995), conocido como el método simplificado mejorado fue desarrollado en 1995, buscando al igual que el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963), un procedimiento que no exigiese la utilización de ningún software de análisis estructural. La principal hipótesis de partida de este método se basa en considerar que los puntales tienen una rigidez finita. Esta es la principal diferencia con el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963) que considera los puntales con un valor de rigidez infinita.

La Figura 2.23 muestra la discretización estructural de la fase de hormigonado considerada por Duan y Chen (1995), donde  $P$  es el peso propio del forjado recién hormigonado ( $n$ ), que se reparte entre los forjados inferiores hormigonados previamente y conectados mediante puntales.

Los incrementos de carga en los puntales  $F_j$ , producidos por las cargas de los forjados  $P_j$  son los siguientes:

$$\begin{aligned}
 F_1 &= P_1 \\
 F_2 &= P_1 + P_2 \\
 &\dots
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

$$F_j = P_1 + P_2 + \dots + P_j$$

...

$$F_n = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n = P$$

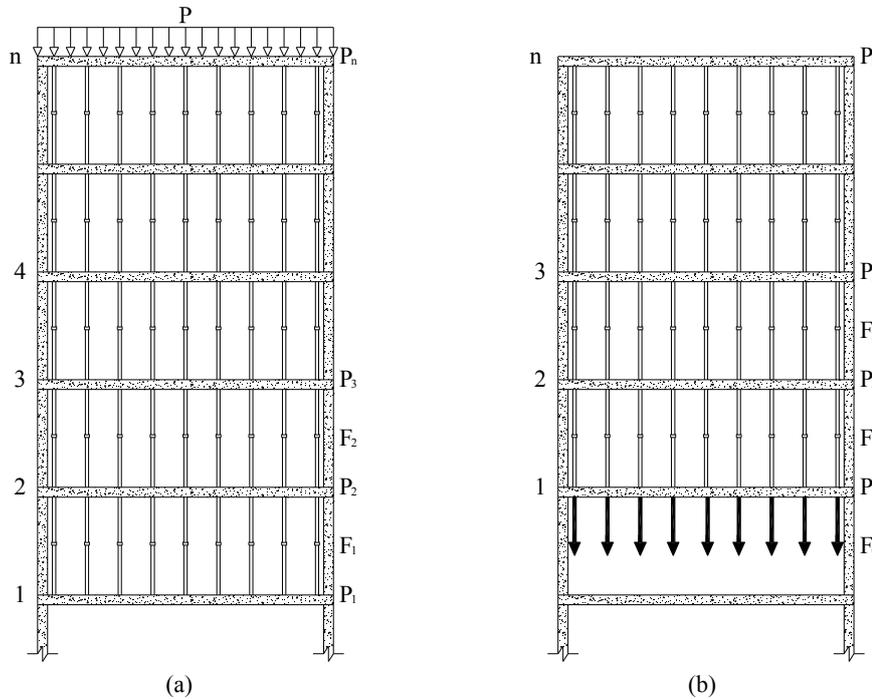


Fig. 2.23 Operaciones de (a) Hormigonado del último forjado y (b) Descimbrado del primer forjado

Asumiendo que las cargas transmitidas a los puntales son uniformemente distribuidas, Duan y Chen (1995) determinaron que la deformación de los puntales ubicados en la parte central, es igual a la deformación media de los puntales ubicados en el mismo nivel. De esta forma aplicando la compatibilidad de desplazamientos para la parte central de los forjados ubicados en  $j$  y  $j-1$  tenemos:

$$\Delta_j = \Delta_{j-1} + \Delta_{sh,j-1} \quad (2.4)$$

donde  $\Delta_j$  y  $\Delta_{j-1}$  son las flechas en el centro de los forjados  $j$  y  $j-1$  respectivamente.  $\Delta_{sh,j-1}$  la deformación media de los puntales ubicados en el nivel  $j-1$ . Sustituyendo deformaciones por esfuerzos, expresando las cargas en puntales en función de las solicitaciones en los forjados, tenemos:

$$K_j \cdot P_j = K_{j-1} \cdot P_{j-1} + K_{sh,j-1}(P_1 + P_2 + \dots + P_{j-1}) \quad (2.5)$$

donde los factores  $K$  se definen como las deformaciones del elemento estructural bajo la acción de una carga unitaria ya sea forjado o puntal. Para el cálculo de estos factores se emplean las siguientes expresiones (la expresión 2.6 para forjados y la expresión 2.7 para puntales):

$$K_j = \gamma \cdot \frac{L^2}{E_j \cdot I} \quad (2.6)$$

$$K_{sh,j-1} = \frac{H}{E_{sh} \cdot A} \quad (2.7)$$

donde  $\gamma$  es un coeficiente que depende de las condiciones de contorno y la relación largo ancho del forjado.  $E_j$  el módulo de elasticidad de los forjados y  $E_{sh}$  es el módulo de elasticidad de los puntales.  $L$  es la longitud del vano más largo del forjado e  $I$  el momento de inercia del forjado suponiendo un ancho unitario.  $H$  es la altura del los puntales y  $A$  el área de todos los puntales.

Una vez calculados los coeficientes  $K$  de forjados y puntales, se definen los ratios de cargas entre dos forjados consecutivos:

$$\begin{aligned} \alpha_{21} &= \frac{P_2}{P_1} = \frac{K_1}{K_2} + \frac{K_{sh}}{K_2} \\ \alpha_{32} &= \frac{P_3}{P_2} = \frac{K_2}{K_3} + \frac{K_{sh}}{K_3} \left(1 + \frac{1}{\alpha_{21}}\right) \\ \alpha_{43} &= \frac{P_4}{P_3} = \frac{K_3}{K_4} + \frac{K_{sh}}{K_4} \left(1 + \frac{1}{\alpha_{32}} + \frac{1}{\alpha_{21} \cdot \alpha_{32}}\right) \end{aligned} \quad (2.8)$$

.....

$$\alpha_{n-1} = \frac{P_n}{P_{n-1}} = \frac{K_{n-1}}{K_n} + \frac{K_{sh}}{K_n} \left(1 + \frac{1}{\alpha_{n-1} \cdot \alpha_{n-2}} + \frac{1}{\alpha_{n-1} \cdot \alpha_{n-2} \cdot \alpha_{n-2} \cdot \alpha_{n-3}} + \dots\right)$$

Por otro lado se tiene que el peso propio  $P$  del forjado recién hormigonado se reparte entre los forjados inferiores conectados por puntales, entonces se cumple que:

$$\sum_{j=1}^n P_j = P \quad (2.9)$$

Así, las solicitaciones de carga en los forjados se pueden calcular por las siguientes expresiones:

$$P_1 = \frac{P}{1 + \alpha_{21} + \alpha_{21} \cdot \alpha_{32} + \alpha_{21} \cdot \alpha_{32} \cdot \alpha_{43} + \dots + \alpha_{21} \cdot \alpha_{32} \cdot \alpha_{n-1} \cdot \alpha_{n-2}} \quad (2.10)$$

$$P_j = \alpha_{j-1} \cdot P_{j-1} \quad (2.11)$$

La operación de descimbrado resulta equivalente a la aplicación de una fuerza equivalente en sentido descendente con la misma magnitud que las fuerzas transmitidas por los puntales retirados. Así, las formulas aplicadas para el descimbrado son análogas al hormigonado, teniendo en cuenta que la transmisión de cargas se realiza en sentido contrario. De esta manera, para el caso de descimbrado presentado en la Figura 2.23 (b) las relaciones entre los incrementos de carga en los forjados  $P_j$  y los incrementos de carga en los puntales  $F_j$ , son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 F_1 &= -(P_2 + P_3 + \dots + P_n) \\
 F_2 &= -(P_3 + P_4 + \dots + P_n) \\
 &\dots \\
 F_j &= -(P_{j+1} + P_{j+2} + \dots + P_n) \\
 &\dots \\
 F_{n-1} &= -P_n
 \end{aligned}
 \tag{2.12}$$

$$\sum_{j=1}^n P_j = F_0
 \tag{2.13}$$

Las ecuaciones de compatibilidad de desplazamientos son similares tanto en el caso de hormigonado como en el caso de descimbrado. Así, se cumple que la carga transmitida por los puntales retirados se reparte entre los forjados superiores cimbrados, validando la expresión 2.13.

Tabla 2.7 Comparación entre los métodos simplificados de Grundy y Kabaila y de Duan y Chen para el caso de dos forjados cimbrados y uno recimbrado.

Paso	Nivel	Método simplificado de Grundy y Kabaila		Método simplificado de Duan y Chen	
		Puntales	Forjado	Puntales	Forjado
1	1	1.00	0.00	1.00	0.00
2	2	1.00	0.00	1.00	0.00
	1	2.00	0.00	1.65	0.35
3,4	2	0.00	1.00	0.39	0.61
	1	0.00	1.00	0.00	1.39
5	3	1.00	0.00	1.00	0.00
	2	1.00	1.00	0.97	1.07
	1	1.00	1.00	0.33	1.59
6	3	0.67	0.33	0.95	0.05
	2	0.33	1.34	0.78	1.16
	1	0.00	1.33	0.00	1.78
7,8	3	0.50	0.50	0.66	0.34
	2	0.00	1.50	0.00	1.65
	1	0.00	1.00	0.00	1.00
9	4	1.00	0.00	1.00	0.00
	3	1.17	0.83	1.14	0.86
	2	0.34	1.83	0.19	1.94
	1	0.00	1.34	0.00	1.19
10	4	0.89	0.11	0.97	0.03
	3	0.95	0.94	1.06	0.91
	2	0.00	1.95	0.00	2.05
	1	0.00	1.00	0.00	1.00

El método simplificado de Duan y Chen (1995) permite calcular los incrementos de carga en las fases de hormigonado y descimbrado. En la Tabla 2.7 se muestran los resultados a manera de coeficiente de carga del método desarrollado por Duan y Chen comparándolos con el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963).

De los resultados obtenidos, Duan y Chen (1995) concluyeron lo siguiente:

- ✓ El método simplificado de Grundy y Kabaila subestima las solicitaciones de los forjados, debido a que considera los puntales como infinitamente rígidos.

- ✓ Para el cálculo de los ratios de cargas muertas en la construcción de forjados sucesivos en altura, se recomienda usar el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963) para unas rigideces de forjado/puntal menores que 0.40, para el resto de los casos el método simplificado de Duan y Chen (1995).
- ✓ Para el cálculo de los ratios de sobrecargas en la construcción de forjados sucesivos en altura, se recomienda usar el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963) para unas rigideces de forjado puntal menores que 0.20, para el resto de los casos el método simplificado de Duan y Chen (1985).

### 2.3.1.9. Método simplificado de Fang et al. (2001)

Fang et al. (2001) propusieron un nuevo método para el cálculo de la transmisión de cargas en la construcción de edificios en altura. La principal consideración de este nuevo método, es considerar que durante el curado del hormigón la rigidez de los elementos estructurales varía significativamente, y en consecuencia los esfuerzos en la estructura tienen que redistribuirse especialmente en forjados recién hormigonados.

El modelo de Fang et al. (2001) considera las siguientes hipótesis:

- ✓ Modelo bidimensional, considerando la unión entre puntales y forjado como una articulación.
- ✓ Se considera la variación del módulo de elasticidad con el tiempo de los elementos de hormigón.
- ✓ La cimentación se considera como infinitamente rígida.
- ✓ El modelo es incremental. Esto significa que considera la acumulación de cargas y desplazamientos.
- ✓ El forjado recién hormigonado evoluciona desde una situación en que no soporta ninguna carga, hasta soportar parte de su peso propio, provocando una redistribución del peso propio del forjado proporcional a su ganancia de rigidez y a la rigidez del sistema de apuntalamiento.

Se describe a continuación el procedimiento para determinar la redistribución de cargas, el cual se basa en expresiones que reparten la carga en función de la relación de rigideces entre los forjados y la cimbra.

La rigidez del forjado en el nivel  $i$  se calcula mediante la siguiente expresión:

$$K_{slab,i} = \frac{\lambda_i \cdot E_{ci} \cdot I_i}{L_{slab}^4} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.14)$$

donde,  $n$  es el número de forjados conectados por puntales,  $\lambda_i$  el coeficiente que considera las condiciones de contorno de los forjados y la naturaleza de las cargas (diferente para cargas puntuales y cargas distribuidas),  $E_{ci}$  módulo de elasticidad del hormigón dependiente del tiempo,  $I_i$  el momento de inercia de la franja de forjado considerado y  $L_{slab}$  la luz del forjado.

La rigidez del sistema de cimbrado ubicado en el nivel  $i$  se calcula mediante la siguiente expresión:

$$K_{shore,i} = \frac{\rho_i \cdot s \cdot E_{shore,i} \cdot A_{shore,i}}{L_{shore,i} \cdot L_{slab}} \quad i = 1, 2, \dots, n - 1 \quad (2.15)$$

siendo,  $s$  el número de puntales instalados en el vano considerado,  $\rho_i$  el coeficiente que considera las cargas desiguales en los puntales,  $E_{shore,i}$  el módulo de elasticidad de los puntales ubicados en el nivel  $i$ ,  $A_{shore,i}$  el área de la sección transversal de los puntales,  $L_{shore,i}$  la longitud de los puntales y  $L_{slab}$  la luz del forjado.

Assumiendo que el peso propio del forjado superior es  $q$ , que la carga soportada por el forjado inferior es  $q_i$ , y que la deformación del forjado  $i$  es  $\Delta_i$ , entonces:

$$\Delta_i = \frac{q_i}{K_{slab,i}} \quad (2.16)$$

$$\Delta_{i+1} - \Delta_i = \sum_{j=1}^i \frac{q_j}{K_{shore,i}} \quad (2.17)$$

$$\sum_{i=1}^n q_i = q \quad (2.18)$$

de la ecuación 2.16 se cumple que:

$$\Delta_1 = \frac{q_1}{K_{slab,1}} \quad (2.19)$$

$$\Delta_2 = \frac{q_2}{K_{slab,2}} \quad (2.20)$$

$$\Delta_2 - \Delta_1 = \frac{q_1}{K_{shore,1}} \quad (2.21)$$

entonces:

$$q_2 = q_1 \left( \frac{K_{slab,2}}{K_{slab,1}} + \frac{K_{slab,2}}{K_{shore,1}} \right) = m_{2,1} \cdot q_1 \quad (2.22)$$

$$v_{i,j} = \frac{K_{slab,i}}{K_{slab,j}} \quad (2.23)$$

$$u_{i,j} = \frac{K_{slab,i}}{K_{shore,j}} \quad (2.24)$$

El coeficiente  $m_{i,1}$  representa la relación de carga soportada por el forjado del nivel  $i$  y la carga soportada por el primer forjado. Los coeficientes  $v_{i,j}$  y  $u_{i,j}$  definen la relación de rigidez entre dos forjados,  $y$  entre el forjado y puntal respectivamente.

Así se tiene que la carga soportada por el forjado del tercer nivel será:

$$q_3 = q_2 \left( \frac{K_{slab,3}}{K_{slab,2}} + \frac{K_{slab,3}}{K_{shore,2}} \right) + q_1 \cdot \frac{K_{slab,3}}{K_{shore,2}} = m_{2,1} \cdot q_1 (v_{3,2} + u_{3,2}) + u_{3,2} \cdot q_1 \quad (2.25)$$

$$= m_{3,1} \cdot q_1$$

La carga soportada por el forjado del nivel  $i$  se puede expresar de la siguiente forma:

$$q_i = m_{i,1} \cdot q_1 \quad (2.26)$$

$$m_{i,1} = m_{i-1,1} \cdot v_{i,i-1} + u_{i,i-1} \cdot \sum_{j=1}^{i-1} m_{j,1} \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (2.27)$$

$$q_i = q \cdot \frac{m_{i,1}}{\sum_{j=1}^n m_{j,1}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.28)$$

Tabla 2.8 Comparación de coeficientes de carga en forjados por diferentes modelos y el modelo de Fang et al. para el caso de dos forjados cimbrados y uno recimbrado

Paso	Nivel	Simplificado Grundy y Kabaila	Mosallam y Chen	Simplificado Mosallam y Chen	Simplificado Duan y Chen	Simplificado Fang et al.
1	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1	0.00	0.86	0.00	0.35	0.38
	2	1.00	0.97	0.93	0.61	0.67
3,4	1	1.00	1.07	1.07	1.39	1.33
	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	2	1.00	1.41	0.93	1.07	1.10
	1	1.00	1.32	1.07	1.59	1.51
6	3	0.33	0.51	0.30	0.05	0.20
	2	1.34	1.31	1.27	1.16	1.14
7,8	1	1.33	1.27	1.43	1.78	1.66
	3	0.50	0.59	0.50	0.34	0.44
9	2	1.50	1.47	1.50	1.65	1.56
	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3	0.83	1.10	0.80	0.86	0.93
9	2	1.83	1.80	1.84	1.94	1.86
	1	1.34	1.22	1.36	1.19	1.20
10	4	0.11	0.51	0.30	0.03	0.30
	3	0.94	0.91	0.84	0.91	0.84
10	2	1.95	1.63	1.86	2.05	1.86
	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Si se considera el peso propio del forjado superior como unitario ( $q = 1$ ), se pueden establecer los coeficientes de carga. La Tabla 2.8 muestra una comparación entre los coeficiente de carga obtenidos con el modelo de Fang et al. y algunos de los modelos descritos anteriormente.

De esta comparación de resultados, Fang et al. (2001) concluyen que los resultados de su nuevo modelo se ajustan a los resultados obtenidos por Mosallam y Chen (1991), y a los resultados obtenidos por el método simplificado de Duan y Chen. Posteriormente y para un ciclo constructivo de tres plantas apuntaladas Fang et al. (2001) consideran que el método de Mosallam y Chen (1991) y el

método simplificado de Duan y Chen (1995), no estiman adecuadamente las solicitaciones de carga máxima en los forjados.

### 2.3.1.10. Métodos propuestos por Beeby (2001)

Beeby (2001) propone la aplicación de dos métodos prácticos que permiten, según el nivel de exactitud requerida, la estimación de la transmisión de cargas durante el proceso constructivo.

El primer método consiste en un procedimiento simple para predecir la transmisión de cargas en forjados y puntales durante el proceso constructivo, que consiste en establecer un porcentaje de cargas transmitidas en el conjunto de la estructura. La Tabla 2.9 muestra los porcentajes de cargas establecidos por Beeby (2001) considerando procesos constructivos con dos y tres juegos de cimbras.

Tabla 2.9 Porcentaje de distribución de cargas durante el proceso constructivo

Localización	Carga	1 Juego de cimbra	2 Juegos de cimbras		3 Juegos de cimbras	
		Forjado	Forjado	Puntales	Forjado	Puntales
Forjado recién hormigonado	Total $w_p$	100%	100%		100%	
Cimbras		100%		100%		100%
Forjado 1		100%	70% $w_p$		65% $w_p$	
Cimbras	$w_{b1}$			30% $w_p$		35% $w_p$
Forjado2			30% $w_p$		23% $w_p$	
Cimbras	$w_{b2}$					12% $w_p$
Forjado 3					12% $w_p$	

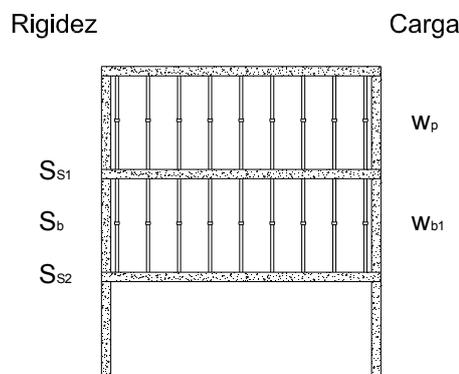


Fig. 2.24 Sistema de puntales para dos niveles de cimbrado

El segundo método consiste en una variación del método simplificado de Grundy y Kabaila (1963), que consiste en la consideración de puntales con rigidez finita, y considerando que los forjados tienen un comportamiento elástico con una rigidez dependiente del tiempo. Para dos niveles de cimbrado (Figura 2.24), la carga en los puntales de la planta inferior cimbrada se corresponde con:

$$w_{b1} = \frac{w_p}{\left(1 + \frac{S_{s1}}{S_{s2}} + \frac{S_{s1}}{S_b}\right)} \quad (2.29)$$

donde,  $w_p$  es la carga en los puntales que soportan el encofrado,  $w_{b1}$  la carga en los puntales de la planta inferior cimbrada,  $S_{s1}$  y  $S_{s2}$  las rigideces de los forjados considerando su variación con el tiempo y  $S_b$  rigidez de los puntales.

Para tres niveles de cimbrado, las cargas en los puntales de las plantas inferiores cimbradas se corresponden con:

$$w_{b1} = \frac{w_p}{\left(1 + \frac{S_{s1}}{S_{s2}} + \frac{S_{s1}}{S_b}\right) - \left[\frac{\left(\frac{S_{s1}}{S_{s2}}\right)}{\left(1 + \frac{S_{s2}}{S_{s3}} + \frac{S_{s2}}{S_b}\right)}\right]} \quad (2.30)$$

$$w_{b2} = \frac{w_{b1}}{\left(1 + \frac{S_{s2}}{S_{s3}} + \frac{S_{s2}}{S_b}\right)} \quad (2.31)$$

En el caso de puntales apoyados en la cimentación, se considera la cimentación como infinitamente rígida y son de aplicación las ecuaciones 2.29 y 2.30 ( $S_{s2} = \infty$ ,  $S_{s3} = \infty$ ).

#### 2.3.1.11. Estudio realizado por Díaz (2008)

El estudio realizado por Díaz (2008), consistió en el análisis de un pórtico de estructura de edificación con vigas planas de 5 vanos y 9 plantas, que recibe un forjado autoportante de 6 m. de luz en las dos direcciones, con un ritmo de ejecución de un semana por planta con tres niveles de cimbrado.

El autor estudia el cimbrado de plantas consecutivas, considerando cuatro diferentes hipótesis:

- ✓ Cimbrado con puntales de rigidez infinita apoyados sobre un suelo de rigidez infinita.
- ✓ Cimbrado con puntales de rigidez finita apoyados sobre un suelo de rigidez infinita.
- ✓ Cimbrado con puntales de rigidez infinita apoyados sobre un suelo de rigidez finita
- ✓ Cimbrado con puntales de rigidez finita apoyados sobre un suelo de rigidez finita.

De forma adicional a las hipótesis comentadas anteriormente, Díaz (2008), considera que todas las plantas de hormigón tienen el mismo módulo de deformación, excepto la recién hormigonada en donde su módulo de deformación se considera como nulo.

Son de resaltar los resultados obtenidos al comparar, para un suelo infinitamente rígido, las cargas obtenidas considerando puntales de rigidez finita y puntales de rigidez infinita. Al considerar puntales con rigidez finita se disminuyen los valores de las cargas actuantes sobre el forjado hasta en un 30% frente a los valores de cargas obtenidos considerando puntales infinitamente rígidos.

De igual forma para vigas en donde el coeficiente de carga que se obtiene supone el 67% del valor obtenido considerando puntales infinitamente rígidos. La Tabla 2.10 muestra una comparación entre los coeficientes de carga en vigas (vano central) considerando puntales de rigidez infinita y puntales de rigidez finita, en ambos casos con los puntales apoyados en un suelo de rigidez infinita.

Tabla 2.10 Comparación entre los coeficientes de carga en vigas (vano central), durante el proceso constructivo para puntales con rigidez finita e infinita Díaz (2008)

Operación	Nivel	Carga en Ejecución KN/m	Carga resultante KN/m		Coeficiente de carga		Relación (2)/(1)
			P. rigidez infinita	P. rigidez finita	P. rigidez infinita (1)	P. rigidez finita (2)	
Hormigonado Forjado 1	1	30.30	-	-	-	-	-
Hormigonado Forjado 2	2	30.30	-	-	-	-	-
	1	35.16	-	17.89	-	0.40	-
Hormigonado Forjado 3	3	30.30	-	-	-	-	-
	2	35.16	-	21.58	-	0.53	-
	1	35.16	-	13.92	-	0.25	-
Descimbrado Forjado 1	3	30.30	24.03	30.35	0.74	1.00	1.35
	2	35.16	31.73	32.58	0.88	0.92	1.05
	1	35.16	44.87	37.28	1.32	1.05	0.80
Hormigonado Forjado 4	4	30.30	-	-	-	-	-
	3	35.16	30.73	46.91	0.84	1.39	1.65
	2	35.16	40.97	41.47	1.19	1.21	1.02
	1	35.16	59.03	44.88	1.80	1.32	0.73
Descimbrado Forjado 2	4	30.30	22.43	29.90	0.68	0.98	1.44
	3	35.16	31.40	37.95	0.86	0.92	1.07
	2	35.16	46.77	37.76	1.39	1.08	0.78
Hormigonado Forjado 5	5	30.30	-	-	-	-	-
	4	35.16	28.43	46.17	0.76	1.37	1.80
	3	35.16	40.57	41.45	1.18	1.21	1.03
	2	35.16	61.73	45.61	1.90	1.35	0.71
Descimbrado Forjado 3	5	30.30	21.50	29.72	0.64	0.98	1.53
	4	35.16	30.17	32.44	0.82	0.90	1.10
	3	35.16	48.83	38.45	1.46	1.10	0.75
Hormigonado Forjado 6	6	30.30	-	-	-	-	-
	5	35.16	27.10	45.88	0.72	1.36	1.89
	4	35.16	38.90	40.75	1.12	1.18	1.05
	3	35.16	64.67	46.62	2.00	1.38	0.69
Descimbrado Forjado 4	6	30.30	20.33	29.20	0.59	0.95	1.61
	5	35.16	30.83	32.89	0.84	0.91	1.08
	4	35.16	49.43	38.54	1.48	1.11	0.75
Hormigonado Forjado 7	7	30.30	-	-	-	-	-
	6	35.16	26.40	45.05	0.66	1.33	2.02
	5	35.16	39.90	41.41	1.15	1.20	1.04
	4	35.16	65.43	46.78	2.02	1.39	0.69
Descimbrado Forjado 5	7	30.30	19.27	29.00	0.55	0.95	1.73
	6	35.16	29.20	32.15	0.79	0.89	1.13
	5	35.16	52.10	39.47	1.57	1.14	0.73
Hormigonado Forjado 8	8	30.30	-	-	-	-	-
	7	35.16	23.90	44.75	0.61	1.32	2.16
	6	35.16	37.63	40.34	1.08	1.17	1.08
	5	35.16	69.17	48.16	2.15	1.43	0.67
Descimbrado Forjado 6	8	30.30	17.80	28.28	0.49	0.92	1.88
	7	35.16	30.10	32.74	0.82	0.91	1.11
	6	35.16	52.73	39.60	1.59	1.14	0.72
Hormigonado Forjado 9	9	30.30	-	-	-	-	-
	8	35.16	21.70	43.55	0.53	1.28	2.42
	7	35.16	39.00	41.29	1.12	1.20	1.07
	6	35.16	70.07	48.42	2.18	1.44	0.66
Descimbrado Forjado 7	9	30.30	16.43	27.92	0.43	0.90	2.09
	8	35.16	27.83	31.59	0.74	0.87	1.18
	7	35.16	56.37	41.11	1.71	1.19	0.70
Descimbrado Forjado 8	9	30.30	24.47	29.31	0.75	0.96	1.28
	8	35.16	41.00	36.15	1.19	1.03	0.87

El valor máximo del coeficiente carga en puntales, obtenido para las mismas condiciones anteriormente expresadas, fue de 2.2, siendo 1.0 el coeficiente de carga en puntales de un forjado recién hormigonado, para los puntales apoyados en la cimentación teniendo las tres plantas consecutivas cimbradas. Este valor es el 67% del valor máximo de coeficiente de carga en el caso de rigidez infinita.

Díaz (2008) también estudió la influencia de algunos factores como la variación del módulo de elasticidad del hormigón con la edad, la variación en las dimensiones de los pilares, variación de rigidez de los puntales comerciales, descimbrado de dos vanos consecutivos manteniendo cimbrados otros tres y el descimbrado de un vano desde el centro hacia los apoyos, encontrando que se alcanza como máximo un 4% de variación frente a los resultados obtenidos en el caso general. Pero hace una especial referencia, argumentado que al descimbrar retirando los puntales desde los apoyos hacia el centro del vano, se produciría un agotamiento de los puntales situados en el centro de este vano.

### ***2.3.2. Estudios Experimentales***

En el presente apartado se explican algunos de los estudios experimentales que plantean la interacción forjado cimbra durante la construcción de forjados sucesivos en altura. Estos estudios han buscado la validación de algunos de los modelos expuestos en el apartado anterior. Sin embargo, cabe resaltar que, en general, la validación experimental es muy escasa, reduciéndose en casi todos los casos a medidas realizadas en obra reales.

#### **2.3.2.1. Medidas realizadas por Agarwal y Gardner (1974)**

Agarwal y Gardner (1974), instrumentaron dos edificios en Canadá. Uno de ellos era para apartamentos, mientras que el otro era una torre para oficinas.

El primero de los edificios, era un edificio de Apartamentos en Alta Vista Drive, Ottawa, que constaba de 22 plantas, con forjados de losa maciza de 20 cm de canto, con luces máximas del orden de 6.15 m. En su construcción se utilizaron tres niveles de forjados cimbrados y cuatro recimbrados. El ritmo de construcción era de dos plantas semanales. Se comenzó a medir en la planta 7ª y se mantuvo hasta la 13ª, completando así un ciclo total de construcción. Es de resaltar que como elemento de medida se usaron bandas extensométricas de 5 mm de longitud colocadas en el cuerpo de los puntales.

El segundo edificio, era para oficinas en la Place du Portage en Hull, Quebec. Tenía 27 alturas, con forjados de 25 cm de canto hasta la planta décima, y de 20 cm en el resto, siempre de losa maciza de hormigón armado. La luz máxima fue de 7.50 m. Se usaron tres juegos de cimbra, sin recimbrado, y el ritmo de construcción fue de una planta a la semana. Se instrumentaron las plantas 19 a 22, para analizar un ciclo de construcción. También se usaron como elemento de medida de cargas en puntales bandas extensométricas.

El desarrollo de estas mediciones permitió establecer que el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963) puede considerarse adecuado, ya que comparando las cargas obtenidas experimentalmente con las cargas obtenidas con dicho método, las desviaciones eran de 5 y 10 %. Sin embargo, los autores

coinciden en la necesidad de realizar más investigaciones, a fin de poder tener en consideración las diferentes variables que aparecen durante el proceso constructivo.

### 2.3.2.2. Medidas realizadas por Lasisi (1979)

Posteriormente, Lasisi (1979) instrumentó la planta séptima a undécima del edificio N° 5 del gobierno de Canadá en Ottawa, mediante el uso de células de carga instaladas bajo los puntales metálicos. El edificio tenía 15 plantas, con un forjado de losa maciza de 25 cm. de canto y para su construcción se usaron un nivel de cimbrado y dos de recimbrado. El plazo que transcurrió desde que se hormigonaba una planta y se cargaba el hormigón de la planta inmediatamente superior era de 10 días. De estas mediciones Lasisi (1979) propuso una pequeña modificación al método simplificado de Grundy y Kabaila (1963), que consiste en considerar las sobrecargas de construcción durante las fases de hormigonado.

### 2.3.2.3. Medidas realizadas por Moragues et al. (1992)

Después de hacer un análisis de las investigaciones acerca de la transmisión de cargas entre forjados durante el proceso constructivo, Moragues et al. (1992) estiman necesario realizar mediciones de las cargas que se producen en la construcción de un edificio, considerando los medios habituales usados en España.

De este modo, se instrumentaron dos edificios ubicados en las ciudades de Benidorm y Alicante. El primero de ellos se trataba de un edificio de apartamentos de 28 plantas, con forjados reticulares de 28 cm de canto, pantallas de arriostramiento frente a esfuerzos de viento, y cimentado sobre una losa de hormigón armado de 1.50 m de canto. La cimbra estaba formada por puntales metálicos arriostrados, con una sección transversal de  $1.81 \text{ cm}^2$ , posicionados en una retícula de  $0.80 \times 0.80 \text{ m}^2$ , igual a la retícula del forjado. El sistema de cimbrado dispone de un dispositivo en la cabeza del puntal que permite retirar el tablero de encofrado y la mitad de los puntales sin dejar de apuntalar el edificio (ver sistema definido en Fig. 2.8).

Se obtuvieron datos desde la cimentación hasta el hormigonado de la 9ª planta, mediante el uso de células de carga con una capacidad máxima de 2000 Kg, dispuestas en la base de los puntales. En el proceso constructivo se mantenía una planta cimbrada y dos clareadas, midiendo las cargas en cuatro puntales por planta.

Según la medición de carga en puntales, se determinó que la carga máxima en puntales se produce cuando están todos los juegos de cimbras, hasta la cimentación. Este valor difiere del teórico esperado al aplicar el método de Grundy y Kabaila (1963), puesto que, de cargar hasta tres veces el peso propio del forjado, se pasó a medir un coeficiente de 1.69. En cuanto a las cargas sobre forjados, se obtuvo que el caso más desfavorable se presenta en el forjado que fue cimbrado hasta la cimentación, cuando sobre él existen tantos forjados como juegos de cimbras utilizados. La diferencia con el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963), es que el coeficiente de carga que se obtuvo fue de 1.84 veces el peso propio, bastante alejado del valor 2.36 propuesto por Grundy y Kabaila (1963).

Tabla 2.11 Coeficientes máximos de carga en forjados

<i>n</i>	Hipótesis						
	Método Grundy y Kabaila	No clareado No E Variable	No Clareado E Variable	Clareado E Variable	No Clareado E Variable	Clareado E Variable	E Benidorm
2	2.25	2.12	2.14	1.77	1.83	-	
3	2.36	2.18	2.22	1.77	1.81	1.84	

En las Tablas 2.11, 2.12 y 2.13 se muestra una comparación de los coeficientes máximos de carga medidos en obra, y los teóricos esperados (estos coeficientes siempre se corresponden a tomar como unidad el peso propio del forjado).

Tabla 2.12 Coeficientes máximos de carga en puntales (Cimentación)

<i>n</i>	Hipótesis						
	Método Grundy y Kabaila	No clareado No E Variable	No Clareado E Variable	Clareado E Variable	No Clareado E Variable	Clareado E Variable	E Benidorm
2	2	1.54	1.73	2.78	2.96	-	
3	3	1.85	2.13	3.15	3.35	3.38	

Tabla 2.13 Coeficientes máximos de carga en puntales (casos restantes)

<i>n</i>	Hipótesis						
	Método Grundy y Kabaila	No clareado No E Variable	No Clareado E Variable	Clareado E Variable	No Clareado E Variable	Clareado E Variable	E Benidorm
2	1.25	1.12	1.16	2.01	2.15	-	
3	1.55	1.34	1.44	2.49	2.60	2.40	

El segundo edificio instrumentado por Moragues et al. (1992), consistía en una estructura de forjados reticulares, de 27 + 4 cm de canto con nervios cada 0.80 m, con un total de 12 forjados. La cimbra utilizada consistió en unos dinteles metálicos, principales, unidireccionales, que se apoyan sobre puntales metálicos separados un metro. Los dinteles se disponían, paralelos entre sí, a una distancia de 1 m. En el proceso constructivo se mantenía una planta cimbrada y dos clareadas, con un ritmo de construcción de 1 planta cada 10 días.

A partir de las mediciones realizadas por Moragues et al. (1992) se pueden extraer los siguientes resultados:

- ✓ Al hormigonar una planta determinada, los puntales de la planta inferior a la de los que soportan aquella, incrementan su medición en un 25 y un 33% de la carga añadida.
- ✓ Al hormigonar una determinada planta, los puntales de la planta situada dos más abajo que aquella, incrementan su carga en un 7%, respecto a la carga añadida.
- ✓ Los valores asumidos por los forjados serían, en forma de coeficientes de carga añadida, un 7% el inferior, entre un 18 y un 25% el intermedio y entre el 75 y el 68% el superior.

#### 2.3.2.4. Medidas realizadas por Ambrose et al. (1994)

Durante la construcción de un edificio en Burlington (Vermont), Ambrose et al. (1994) instrumentaron puntales bajo un forjado recién hormigonado, instalando células de carga en la base de dichos puntales. El objetivo de la experimentación consistía en medir la evolución de las cargas en los puntales en el tiempo durante las primeras 72 horas posteriores al hormigonado del forjado.

Una vez transcurridas las 72 horas, las cargas en los puntales descendieron hasta llegar a un 75% de su carga inicial, debido al aumento de rigidez de la losa de hormigón. De esta forma Ambrose et al. (1994), concluyeron que durante el proceso de curado del hormigón se presenta una redistribución del peso propio del forjado, considerando que el forjado va asumiendo un mayor porcentaje de carga hasta que termina el proceso de curado.

#### 2.3.2.5. Medidas realizadas por Rosowsky et al. (1997)

Rosowsky et al. (1997) desarrollaron un completo estudio acerca de la evolución de cargas en puntales durante un proceso de cimbrado y descimbrado. Esta investigación se basó en las mediciones realizadas durante la construcción de un edificio en Beckley (W. Va.). El desarrollo experimental consistió en colocar 8 puntales instrumentados en dos zonas diferentes, la primera en una pequeña área en la que 4 puntales estaban instrumentados, y la segunda en un área mayor donde 8 de 16 puntales se encontraban instrumentados.

Rosowsky et al. (1997) estudiaron la evolución de cargas en puntales durante los tres o cuatro primeros días después del hormigonado del forjado, controlando que las sobrecargas de ejecución aplicadas sobre el forjado fueran relativamente bajas. Las variaciones registradas durante este periodo de tiempo fueron diferentes según la zona instrumentada, presentándose mayores variaciones en la zona con una mayor área. En ambas zonas las variaciones de carga en los puntales fueron de carácter cíclico (diario) aunque con una tendencia decreciente con el tiempo, lo que llevó a concluir por parte de los autores que estas variaciones se debían a cambios medioambientales en la obra asociados también con efectos de fluencia y ganancia de rigidez del hormigón.

#### 2.3.2.6. Medidas realizadas por Beeby (2001)

Durante la construcción del edificio European Concrete Building Project (edificio construido en condiciones controladas de laboratorio y con fines exclusivamente de investigación), en Cardington (Reino Unido), Beeby (2001) realizó mediciones de la distribución de cargas en puntales y forjados.

Los forjados analizados tenían todos una canto de 25 cm, considerando un peso propio de  $6.25 \text{ kN/m}^2$  (tomando como densidad del hormigón  $25 \text{ kN/m}^3$ ).

Los ciclos de construcción de la estructura quedaron definidos, para dos juegos de cimbras, con una planta cimbrada y una planta recimbrada.

Las medidas tomadas se muestran a continuación, así como una comparación con el método desarrollado por Beeby (2001). Las cargas en puntales y forjados se corresponden con el valor máximo de carga transmitido por el puntal más cargado al forjado.

Tabla 2.14 Distribución de cargas en puntales y forjados (Hormigonado forjado 2)

Nombre	Valor estimado Beeby (2001) (kN/m <sup>2</sup> )			Medición (kN/m <sup>2</sup> )		$f_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Edad
	Puntal	Forjado antes	Forjado actual	Puntal	Forjado		
Forjado 2 (Cimbrado)	8.25		0	6.5	0	0	0
Forjado 1 (Recimbrado)	2.48	6.75	11.30		0	52	11 días
Cimentación		0	2.48				

Tabla 2.15 Distribución de cargas en puntales y forjados (Descimbrado forjado 1 y forjado 2)

Nombre	Valor estimado Beeby (2001) (kN/m <sup>2</sup> )			Medición (kN/m <sup>2</sup> )		$f_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Edad
	Puntal	Forjado antes	Forjado actual	Puntal	Forjado		
Forjado 2 (Descimbrado)		0	6.75		6.0	24	25 h
Forjado 1 (Descimbrado)		11.30	6.75		6.0	55	12 días
Cimentación		2.48	0				

Tabla 2.16 Distribución de cargas en puntales y forjados (Montaje cimbra y acero forjado 3)

Nombre	Valor estimado Beeby (2001) (kN/m <sup>2</sup> )			Medición (kN/m <sup>2</sup> )		$f_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Edad
	Puntal	Forjado antes	Forjado actual	Puntal	Forjado		
Forjado 3 (Cimbrado)	1.25			0.7			
Forjado 2 (Descimbrado)		6.75	8.00		6.70		
Forjado 1 (Descimbrado)		6.75	6.75		6.00		
Cimentación		0	0				

Tabla 2.17 Distribución de cargas en puntales y forjados (Recimbrado forjado 2)

Nombre	Valor estimado Beeby (2001) (kN/m <sup>2</sup> )			Medición (kN/m <sup>2</sup> )		$f_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Edad
	Puntal	Forjado antes	Forjado actual	Puntal	Forjado		
Forjado 3 (Cimbrado)	1.25			0.70			
Forjado 2 (Recimbrado)	0	8.00	8.00	0.60	6.10		
Forjado 1 (Descimbrado)		6.75	6.75		6.60		
Cimentación		0	0				

Tabla 2.18 Distribución de cargas en puntales y forjados (Hormigonado forjado 3)

Nombre	Valor estimado Beeby (2001) (kN/m <sup>2</sup> )			Medición (kN/m <sup>2</sup> )		$f_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Edad
	Puntal	Forjado antes	Forjado actual	Puntal	Forjado		
Forjado 3 (Cimbrado)	6.00	0	0	6.52			
Forjado 2 (Recimbrado)	1.80	8.00	10.70	2.20	10.32	47	13 días
Forjado 1 (Descimbrado)		6.75	7.80		8.20	65	24 días
Cimentación		0	0				

Tabla 2.19 Distribución de cargas en puntales y forjados (Descimbrado forjados 3 y 2):

Nombre	Valor estimado Beeby (2001) (kN/m <sup>2</sup> )			Medición (kN/m <sup>2</sup> )		$f_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Edad
	Puntal	Forjado antes	Forjado actual	Puntal	Forjado		
Forjado 4 (Cimbrado)	1.25						
Forjado 3 (Descimbrado)	-	0	8.00		6.0	23	43 horas
Forjado 2 (Descimbrado)	-	10.70	6.75		6.0	48	15 días
Forjado 1 (Descimbrado)		7.80	6.75		6.0	65	26 días
Cimentación		0	0				

### 2.3.2.7. Medidas realizadas por Fang et al. (2001)

Fang et al. (2001) realizaron uno de los programas experimentales más extensos durante la construcción de un edificio de hormigón armado de plantas sucesivas en Beijing (China). Las medidas se realizaron mediante el pegado de bandas extensométricas a 52 puntales teniendo de esta forma 26 puntales instrumentados por planta.

Los forjados construidos consistieron en losas macizas de hormigón armado y vigas. El canto del forjado fue de 0.11 m con un hormigón de 22 MPa, y una luz entre pilares de 3.60 m. El ciclo constructivo consistió en mantener dos forjados cimbrados consecutivos, con un ritmo de ejecución de 15 días por planta. Las medidas se tomaron desde el hormigonado del segundo forjado hasta el cuarto. La Tabla 2.20 muestra las cargas obtenidas en cada fase constructiva considerando como la unidad el peso propio del forjado.

Fang et al. (2001) compararon los resultados experimentales con las cargas estimadas usando el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963), encontrando diferencias de hasta un 27.2% en la estimación de las cargas en los forjados. También compararon sus resultados con su modelo numérico (descrito en el apartado 2.3.1.9), encontrando que las estimaciones realizadas con este método diferían

sólo un 5.3%, considerándolo como aceptable para estimar la distribución de cargas tanto en puntales como en los forjados.

Tabla 2.20 Coeficientes de carga en puntales y forjados medidos por Fang et al. (2001)

Paso	Operación	Nivel	Medidas en forjados	
			Forjado	Puntales
1	Hormigonado Forjado 2	2	0.248	0.752
		1	-	-
		0	-	-
2	1 día después hormigonado forjado 2	2	0.420	0.580
		1	-	-
		0	-	-
3	Descimbrado forjado 1	2	0.540	0.460
		1	1.460	-
		0	-	-
4	Hormigonado forjado 3	3	0.217	0.783
		2	1.006	0.777
		1	1.777	-
5	1 día después hormigonado forjado 3	3	0.303	0.697
		2	0.949	0.748
		1	1.748	-
6	Descimbrado forjado 2	3	0.544	0.456
		2	1.456	-
		1	-	-
7	Hormigonado forjado 4	4	0.186	0.895
		3	1.045	0.769
		2	1.769	-
8	1 día después hormigonado forjado 4	4	0.342	0.658
		3	0.897	0.761
		2	1.761	-
9	Descimbrado forjado 3	4	0.419	0.581
		3	1.581	-
		2	-	-

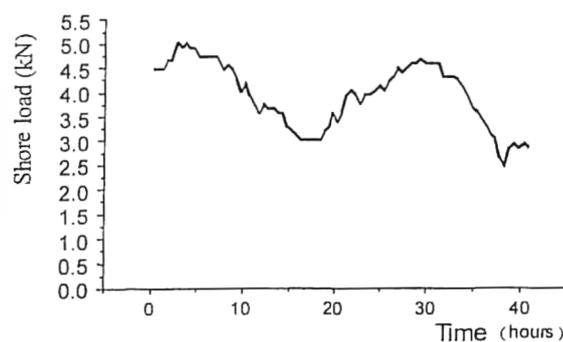


Fig. 2.25 Evolución de cargas en puntales medida por Fang et al.

Adicionalmente, durante la construcción del tercer forjado, Fang et al. (2001) monitorizaron de forma continua las cargas en los puntales después de la fase de hormigonado y durante los siguientes dos días. Encontrado una tendencia decreciente en general de las cargas en los puntales. Así, se evidencia que durante el proceso de curado, el forjado empieza a soportar parte de su peso propio. También

encontraron que se presentaban variaciones cíclicas diarias en las cargas de los puntales (véase Fig. 2.25), por lo que concluyen que la evolución de cargas en los puntales se encuentra afectada por factores como las variaciones de temperaturas, la fluencia o el aumento de rigidez de los forjados.

### 2.3.2.8. Medidas realizadas por Puente et al. (2007)

Durante la construcción de dos edificios ubicados en Getaria y Azkoitia (España), Puente et al. (2007) tomaron medidas de las cargas en puntales, con el objetivo de ver cómo se reparten los pesos propios entre forjados sucesivos conectados por puntales durante el proceso constructivo. El edificio de Getaria contaba con siete plantas de las cuales cuatro corresponden a sótanos con un uso de plazas de aparcamiento, en las cuales se instalaron 34 puntales instrumentados por planta. Los puntales fueron instrumentados mediante 4 bandas extensométricas en puente de Wheatstone por puntal, dos de ellas activas en ramas opuestas, eliminando la influencia de la deformación por flexión del puntal, y las otras dos para la compensación por temperatura.

La Tabla 2.21 muestra una comparación entre los resultados obtenidos con diferentes métodos de estimación de cargas con los registrados experimentalmente en la obra de Getaria (considerando como unidad el peso propio del forjado).

Tabla 2.21 Comparación entre las medidas experimentales de Puente et al. con diferentes métodos de estimación de cargas

Operación	Nivel	Simp. E <sub>cte</sub>	Simp. E <sub>var</sub>	Refin. 2D	Refin. 3D	Moss-Chen 2D	Moss-Chen 3D	Simp. Modif.	Simp. Mej.	Medida Exper.
Hormigón sótano -4	-4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99
Hormigón sótano -3	-3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.02
	-4	2.00	2.00	1.41	1.51	1.10	0.97	2.00	1.59	1.35
Hormigón sótano -2	-2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.07
	-3	2.00	2.00	1.33	1.41	0.95	0.83	2.00	1.48	1.35
	-4	3.00	3.00	1.58	1.73	1.05	1.03	3.00	1.86	1.53
Descimb. sótano -4	-2	0.00	0.14	0.84	0.79	0.37	0.31	0.14	0.75	0.95
	-3	0.00	0.11	0.84	0.79	0.30	0.31	0.11	0.74	0.84
Hormigón sótano -1	-1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.94
	-2	0.67	0.84	1.17	1.17	0.82	0.70	0.82	1.21	1.23
	-3	0.33	0.47	0.95	0.93	0.45	0.49	0.45	0.91	0.96
Descimb. sótano -3	-1	0.89	0.85	0.92	0.89	0.34	0.32	0.65	0.87	0.81
	-2	0.44	0.53	0.91	0.88	0.38	0.36	0.40	0.84	0.86
Descimb. sótano -2	-1	0.67	0.59	0.70	0.63	0.26	0.21	0.44	0.58	0.64

En la Tabla 2.21 Simp. E<sub>cte</sub> = método simplificado de Grundy y Kabaila considerando el módulo de elasticidad constante, Simp. E<sub>var</sub> = método simplificado de Grundy y Kabaila considerando el módulo de elasticidad variable, Refin. 2D y Refin. 3D = método de Liu et al. en dos y tres dimensiones, Moss-Chen 2D y 3D = método de Mosallam y Chen en dos y tres dimensiones, Simp. Modif. = método simplificado modificado de Mosallam y Chen, Simp. Mej. = método simplificado mejorado de Duan y Chen, Medida Exper. = medidas experimentales realizadas por Puente et al. (2007).

Al comparar los resultados obtenidos de esta investigación con los diferentes métodos de predicción de cargas, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- ✓ En general, todos los modelos teóricos predicen correctamente la posición de la carga máxima durante el proceso de construcción.
- ✓ Los métodos desarrollados por Liu et al. (1985), son los más acertados en la predicción de los valores de carga. Sin embargo, son métodos cuya aplicación resulta compleja.
- ✓ El método simplificado mejorado (Duan y Chen, 1995) predice con una precisión razonable las cargas originadas en los puntales durante la construcción de una estructura de hormigón.

Además del estudio de la transmisión de cargas entre puntales y forjados durante el proceso constructivo, Puente et al. (2007) realizaron un estudio de la influencia de la temperatura en la transmisión de dichas cargas en la estructura. Se observó que fluctuaciones de temperaturas diarias pueden producir cambios en los valores de carga en puntales de hasta 300 Kg. La Figura 2.26 muestra la variación por temperatura en algunos de los puntales instrumentados.

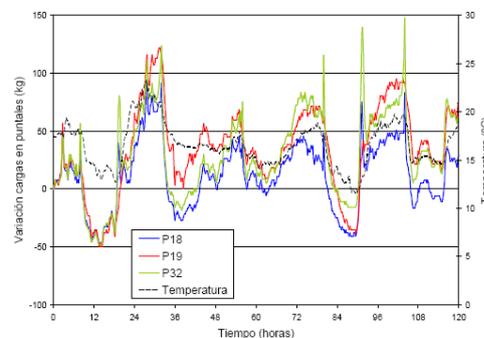


Fig. 2.26 Evolución de carga en puntales medida por Puente et al. (2007)

## 2.4. Estimación del plazo de descimbrado

La determinación del plazo de descimbrado, depende fundamentalmente del momento en el que el hormigón es capaz de resistir los esfuerzos a los cuales va a estar sometido durante el proceso de construcción. El desarrollo de las resistencias mecánicas a corto plazo, para un hormigón determinado, depende fundamentalmente de la composición de la mezcla y de la temperatura.

En el presente apartado se recogen algunos métodos que permiten determinar la resistencia necesaria del hormigón de los forjados para soportar las cargas que se presentan durante su construcción. Dentro de estos métodos se recogen también las recomendaciones para determinar los plazos de descimbrado incluidas en normativas de carácter nacional e internacional.

### 2.4.1. Condición de descimbrado

Establecer un juicio sobre la edad de descimbrado supone verificar que, bajo las acciones aplicadas en ese momento, los esfuerzos que aparecen pueden ser resistidos con seguridad suficiente con la resistencia que el hormigón presenta a esa edad (Calavera 1981).

Así, queda claro que para establecer la edad de descimbrado de un forjado es necesario establecer una serie de condicionantes, de tal forma que la estructura no vea afectada sus características de servicio.

A continuación se recogen las propuestas de algunos autores que establecen condicionantes para realizar el proceso de descimbrado.

#### 2.4.1.1. Método propuesto por Calavera (1981) y Fernández (1986)

El método propuesto por Calavera fue publicado por primera vez en 1981, como fruto de un extenso estudio que posteriormente sería validado experimentalmente por Fernández Gómez (1986) en el desarrollo de su Tesis Doctoral. Este método no es solo válido para forjados, siendo también aplicable para piezas de hormigón sometidas a flexión.

En la Tabla 2.22 se relacionan en función de la relación  $\frac{f_{c,j}}{f_{c,28}}$  del hormigón a compresión, la evolución de las resistencias a corte y punzonamiento, tracción y flexión, según las leyes teóricas establecidas por la EHE.

Tabla 2.22 Relación de resistencias en función de la resistencia a compresión del hormigón (Considerando la relación pésima, que se obtiene para el hormigón de menor resistencia para edificación según la EHE,  $f_{ck} = 25$  MPa.)

Relación a Compresión $\frac{f_{c,j}}{f_{c,28}}$	Tracción, Adherencia y Rasante $\sqrt[3]{\left(\frac{f_{c,j}}{f_{c,28}}\right)^2}$	Corte y Punzonamiento $\left(\sqrt{\frac{f_{c,j}}{f_{c,28}}}\right)^{\frac{1}{3}}$	Flexión		Deformaciones $\left(\frac{f_{c,j} + 8}{f_{c,28} + 8}\right)^{\frac{1}{3}}$
			Cuantía Baja	Cuantía Alta	
0	0	0	0	0	-
0.25	0.40	0.63	0.81	-	0.75
0.50	0.63	0.79	0.94	0.85	0.85
0.75	0.83	0.91	0.99	0.88	0.93
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

De la Tabla 2.22 se concluye que la evolución de resistencia que resulta crítica es la de la resistencia a tracción del hormigón, que en realidad no es directamente la única resistencia que interviene en el comportamiento de un forjado, pero sin embargo es aquella que resulta condicionante, dado que de ella dependen entre otras cosas, la resistencia a flexión, anclaje, etc.

De igual forma también se observa como la evolución del módulo de deformación (inversamente proporcional a las deformaciones), es mucho más rápida que la resistencia a tracción, por lo cual, este último criterio resulta ser más restrictivo. Por este motivo, la mayoría de autores adoptan la resistencia a tracción como condicionante del proceso de descimbrado.

De esta forma, si la carga actuante sobre un forjado al descimbrar es  $\alpha \cdot p$  siendo  $p$  la carga total característica del proyecto, (peso propio más cargas permanentes más sobrecargas), el forjado podrá ser descimbrado cuando el hormigón del propio forjado, presente una resistencia a tracción pura  $f_{ckt,j}$  tal que:

$$f_{ckt,j} \geq \alpha \cdot f_{ckt,28} \tag{2.32}$$

Considerando que se trata de una etapa transitoria, la EHE permite que el factor de mayoración de acciones durante la etapa de construcción ( $\gamma'_{fg}$ ), pueda reducirse, no siendo menor a 1.25. La EHE no propone el valor del coeficiente de mayoración de acciones durante la construcción. Sin embargo parece lógico que éste dependa del nivel de control. De esta forma Calavera (2002) propone los siguientes valores dependientes del nivel de control:

$$\gamma'_{fg} = 1.30 \text{ para obras con control de ejecución intenso.}$$

$$\gamma'_{fg} = 1.35 \text{ para obras con control de ejecución normal.}$$

$$\gamma'_{fg} = 1.40 \text{ para obras con control de ejecución reducido.}$$

Así la ecuación (2.32) queda de la siguiente forma:

$$f_{ckt,j} \geq \alpha \cdot \frac{\gamma'_{fg}}{\gamma_{fg}} \cdot f_{ckt,28} \quad (2.33)$$

donde,  $f_{ckt,j}$  es la resistencia a tracción del hormigón a los  $j$  días,  $f_{ckt,28}$  la resistencia a tracción del hormigón a los 28 días,  $\alpha$  la relación entre la carga característica de construcción y la carga característica del forjado,  $\gamma'_{fg}$  el coeficiente de mayoración de acciones de la etapa de construcción y  $\gamma_{fg}$  el coeficiente de mayoración de acciones definido en el artículo 12 de la EHE.

Si la ecuación 2.33 se cumple para todos los forjados en todas las operaciones constructivas, solo faltaría establecer a qué edad el hormigón alcanza el valor de resistencia necesario para realizar el proceso de descimbrado.

#### 2.4.1.2. Método propuesto por Marí (1995)

Partiendo de un amplio estudio experimental desarrollado por Serrà (1994), en vigas descimbradas a edades cortas, Marí (1995) estableció una serie de hipótesis como punto de partida para el desarrollo de una metodología para el cálculo del plazo de descimbrado en estructuras de hormigón solicitadas a flexión. Dichas hipótesis de partida son las siguientes:

- ✓ Los modelos propuestos por las diferentes normativas europeas para el cálculo de flexión y cortante de una pieza de hormigón, son adecuados para predecir el comportamiento de dicha pieza a edades jóvenes. Considerando las características mecánicas del hormigón correspondientes a la edad de descimbrado.
- ✓ La adherencia entre el hormigón y acero, para edades habituales de descimbrado, es suficiente para considerar los mecanismos propios del hormigón armado.
- ✓ La deformabilidad diferida resulta ser el factor más condicionante, por tanto el que requiere de un mayor control.

A partir de estas hipótesis, Marí (1995) desarrolla una metodología que consiste en determinar, para cada uno de los estados límites, que características mecánicas debe tener el hormigón para satisfacer

dicho estado límite. Verificando esto, tanto para el instante del descimbrado como para la vida útil de la estructura.

La Tabla 2.23 muestra las formulas propuestas por Marí, derivadas de la satisfacción de los estados límite de flexión, cortante, adherencia, anclaje, fisuración y deformabilidad. En estas intervienen parámetros como la geometría, armado y nivel de cargas en construcción.

Considerando cada una de las expresiones de la Tabla 2.23, y empleando una metodología para establecer la evolución de las propiedades del hormigón en el tiempo, la metodología propuesta por Marí (1995) permite estimar los plazos de descimbrado de vigas y forjados de hormigón sin perjudicar la seguridad, funcionalidad y durabilidad de la estructura.

Tabla 2.23 Criterios para establecer plazos de descimbrado propuestos por Marí

Estado límite	Condición a cumplir
Flexión	$f_{c,j} \geq 1500 \cdot (\rho - \rho')$
Cortante	$f_{c,j} \geq 5 \cdot \frac{A_{st} \cdot f_{td}}{b}$
Adherencia	$f_{c,j} \geq k \cdot \left( \frac{A_{st} \cdot f_{td}}{n \cdot \pi \cdot \phi_1} \right)^{\frac{3}{2}}$
Anclaje	$f_{c,j} \geq f_{c,28} \cdot \left( \frac{G}{G+Q} \right)^{\frac{3}{2}}$
Deformabilidad	$E_{c,j} \geq E_{c,28} \cdot f(j) \cdot \frac{\alpha_{28}}{\alpha_{adm}}$
Fisuración	$f_{c,t} \geq f_{c,28} \cdot \frac{G}{G+Q}$

### 2.4.1.3. Método por comprobación de coeficientes de carga

El método consiste en la verificación de los forjados valiéndose en el diseño clásico mediante cargas y resistencias factorizadas (LRFD, Load a Resistance Factored Design).

Considerando las cargas muertas y las sobrecargas actuantes en un forjado, los requisitos de resistencia del hormigón para satisfacer el estado de servicio se pueden determinar mediante la siguiente expresión:

$$R_n = \frac{\gamma_D \cdot D_s + \gamma_L \cdot L_s}{\Phi_s} \quad (2.34)$$

siendo,  $\gamma_D$  y  $\gamma_L$  los factores de mayoración de cargas muertas y sobrecargas respectivamente,  $\Phi_s$  el coeficiente de reducción de resistencia del hormigón para el estado de servicio,  $D_s$  y  $L_s$  las cargas muertas y sobrecargas de diseño y  $R_n$  la resistencia nominal del hormigón del forjado.

Asumiendo que el factor reductor de resistencia del hormigón es similar para los estados de servicio y de construcción, la resistencia de diseño  $U_n$  de una losa de hormigón a edades tempranas se puede expresar como:

$$U_n = \Phi_c \cdot \beta \cdot R_n = \beta(\gamma_D \cdot D_s + \gamma_L \cdot L_s) \quad (2.35)$$

donde,  $\beta$  es el factor reductor de la resistencia del hormigón asociado a una edad temprana.

Finalmente debe comprobarse que las sollicitaciones de carga son menores a las capacidades resistentes de la losa de hormigón:

$$\gamma'_{fg} \cdot C_t \leq U_n \quad (2.36)$$

siendo,  $\gamma'_{fg}$  el factor de mayoración de cargas de construcción, y  $C_t$  es la carga actuante calculada para el forjado durante el proceso constructivo, que dependerá del modelo de cálculo empleado para estimar la distribución de cargas entre puntales y forjados.

Así, reemplazando la ecuación 2.35 tenemos la siguiente expresión que permite verificar si el proceso constructivo empleado es adecuado para cada uno de los forjados de la estructura analizada:

$$C_t \leq \beta \cdot \frac{(\gamma_D \cdot D_s + \gamma_L \cdot L_s)}{\gamma'_{fg}} \quad (2.37)$$

Mosallam y Chen (1990) modificaron la Ec. (2.37), adoptando los factores de mayoración de cargas recomendados por los códigos de edificación americanos:  $\gamma_D = 1.40$  y  $\gamma_L = 1.70$  (norma ACI Committee 318 1983), y  $\gamma'_{fg} = 1.30$  para las cargas de construcción propuesto en la norma de la ANSI A10.9 (1983). También proponen el uso del método simplificado de Grundy y Kabaila (1963) para estimar las transmisión de cargas entre puntales y forjados durante el proceso constructivo, pero amplificando las cargas por un factor de 1.10 debido a la imprecisión del método. Así, la Ec. 2.37 se simplifica en:

$$C_t \leq \beta \cdot (1.00 \cdot D_s + 1.20 \cdot L_s) \quad (2.38)$$

Duan y Chen (1996), a diferencia de Mosallam y Chen (1990) proponen no mayorar las cargas de construcción, puesto que para el cálculo de  $C_t$  se trabaja con acciones mayoradas. También proponen el uso del método simplificado de Grundy y Kabaila (1963) para estimar la distribución de cargas en puntales y forjados, dependiendo del valor de la relación entre la rigidez de la losa y la de la cimbra. Así la expresión propuesta por Duan y Chen (1996) es la siguiente:

$$C_t \leq \beta \cdot (1.40 \cdot D_s + 1.70 \cdot L_s) \quad (2.39)$$

Mediante la validación de estas expresiones se puede determinar si el proceso constructivo diseñado es adecuado para todos los forjados y para todas las fases de la construcción de la estructura.

#### **2.4.2. Estimación del plazo de descimbrado**

Una vez establecido el condicionante para realizar la operación de descimbrado, que en todos los casos viene condicionado por el desarrollo de las propiedades del hormigón en el tiempo, haría falta determinar la evolución de dichas propiedades.

A continuación se analizarán 3 metodologías para determinar la evolución de las propiedades del hormigón, considerándolas como válidas para los tipos de materiales empleados en España en la actualidad.

#### 2.4.2.1. Método mediante el ensayo de probetas de hormigón.

Este método consiste en controlar el desarrollo de las propiedades del hormigón mediante el ensayo de probetas cilíndricas de 15 x 30 cm curadas en condiciones de obra.

Si se aplica esta metodología al condicionante propuesto por Calavera (1981), se presenta la dificultad derivada de realizar ensayos a tracción directa. Por consiguiente, Calavera (1981) propone emplear el ensayo brasileño para determinar la resistencia a tracción indirecta del hormigón, que resulta ser un ensayo de fácil ejecución en laboratorio.

Así, considerando que la resistencia a tracción pura ( $f_{ckt}$ ), está relacionada con la resistencia a tracción indirecta obtenida en el ensayo brasileño ( $f'_{ckt}$ ) mediante la siguiente expresión:

$$f_{ckt} = 0.85 \cdot f'_{ckt} \quad (2.40)$$

se tiene que la expresión 2.33 queda de la siguiente forma:

$$f'_{ckt,j} \geq \frac{\alpha}{0.85} \cdot \frac{\gamma'_{fg}}{\gamma_{fg}} \cdot f_{ckt,28} \quad (2.41)$$

Si se considera que la resistencia a tracción pura del hormigón ( $f_{ckt,28}$ ) se corresponde, empleando la fórmula de la EHE, con la resistencia a compresión del hormigón a 28 días ( $f_{ck,28}$ ) mediante la siguiente expresión:

$$f_{ckt,28} = 0.21 \cdot \sqrt[3]{(f_{ck,28})^2} \quad (2.42)$$

se tiene que la condición de descimbrado queda en función de la resistencia a compresión del hormigón de la siguiente forma:

$$f_{ckt,j} \geq 0.25 \cdot \alpha \cdot \frac{\gamma'_{fg}}{\gamma_{fg}} \cdot \sqrt[3]{(f_{ck,28})^2} \quad (2.43)$$

#### 2.4.2.2. Método de las curvas de referencia

El desarrollo de curvas de evolución de las propiedades del hormigón con el tiempo a diferentes temperaturas, constituiría un método para el cálculo del plazo de descimbrado.

Concretamente si nos basamos en el hecho demostrado por Calavera (1981), que considera que la evolución de resistencia crítica es la de la resistencia a tracción, autores como Klieger (1958), Gardener y Poon (1976) y Fernández (1986), ha definido algunas curvas de evolución de resistencia a tracción en función de la temperatura y del tipo de cemento empleado.

Las Figuras 2.27 a 2.30 se representan las curvas obtenidas por Fernández (1986) para algunos cementos españoles.

La aplicación de este método tiene el inconveniente en que las curvas obtenidas por los autores anteriormente mencionados dependen del tipo de cemento utilizado e incluso del tipo de adición empleada (Pereperez 1981), circunstancia que hace necesario la suministración por parte de los Fabricantes de cemento, de las curvas de evolución de la resistencia a tracción a diferentes temperaturas.

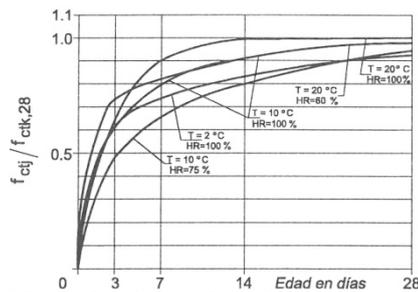


Fig. 2.27 Evolución de la resistencia a tracción, en función de la resistencia a tracción a 28 días (Cemento P-450 ARI)

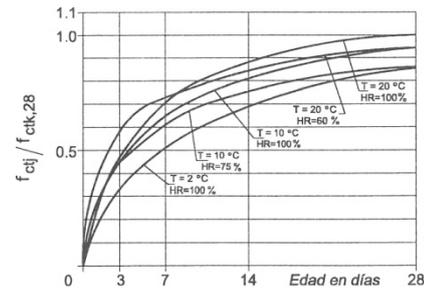


Fig. 2.28 Evolución de la resistencia a tracción, en función de la resistencia a tracción a 28 días (Cemento P-350)

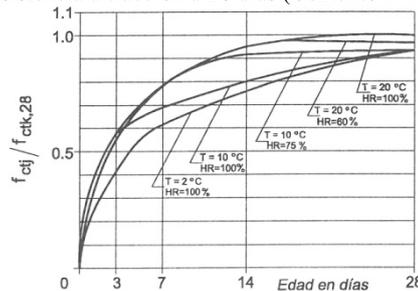


Fig. 2.29 Evolución de la resistencia a tracción, en función de la resistencia a tracción a 28 días (Cemento PA-350 Adición escoria)

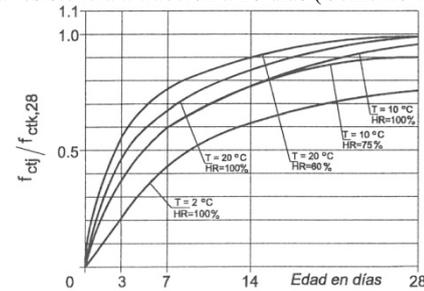


Fig. 2.30 Evolución de la resistencia a tracción, en función de la resistencia a tracción a 28 días (Cemento PA-350 Adición puzolana)

#### 2.4.2.3. Aplicación del método de la madurez al descimbrado de forjados de hormigón

Alvarado et al. (2006), proponen una metodología basada en el método de la madurez del hormigón y en la condición de descimbrado propuesta por Calavera (1981).

La madurez es el grado de desarrollo alcanzado por una determinada propiedad de una mezcla de base de cemento, y depende de la historia de temperaturas a lo largo del proceso de curado (ASTM C 1074-98 1999).

La técnica de la madurometría permite mediante la medida de la temperatura del hormigón y el tiempo, evaluar la evolución de cualquier parámetro en tiempo real y para una temperatura dada.

El concepto de madurometría está basado en el principio de tiempo equivalente y considera una energía de activación aparente del material, para estimar la resistencia real del hormigón puesto en obra.

El tiempo equivalente o edad teórica se puede definir como el número  $j$  de días (o de horas) necesario, a una temperatura de referencia  $T_R$ , para que la madurez de la mezcla se iguale a la alcanzada con temperaturas distintas a la de referencia aplicadas durante un periodo de tiempo  $t$  (ASTM 1999). Con base en la ley de Arrhenius (Ec. 2.44), Freiesleben Hansen y Pedersen (1977) propusieron la Ec. 2.45 de tiempo equivalente (CEB 1992).

$$k = A \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot T}} \quad (2.44)$$

Donde,  $k$  es la constante de velocidad (1/s para una reacción de primer orden),  $A$  la constante denominada factor de frecuencia (1/s para un reacción de primer orden),  $E$  la energía de activación (independiente de la temperatura),  $T$  la temperatura en grados kelvin y  $R$  la constante de los gases perfectos (8.3144 J/°K mol).

$$j = \sum_{i=0}^{i=t} \left( e^{\frac{E}{R} \left( \frac{1}{273+T_R} - \frac{1}{273+T_i} \right)} \cdot \Delta t_i \right) \quad (2.45)$$

Siendo,  $j$  el tiempo equivalente en días,  $E$  la energía de activación aparente (J/mol),  $T_R$  la temperatura de referencia y  $T_i$  la temperatura en el intervalo de tiempo  $\Delta t_i$  en grados centígrados.

Como valor de energía de activación, según propuesta del Código Modelo CEB-FIP 1990 (CEB-FIP 1993) y por el anejo B de la propuesta de modificación del Eurocódigo 2, se considera una energía aparente de activación constante e igual, aproximadamente a 33258 J/mol y una temperatura de referencia de 20°C. De esta forma el tiempo equivalente se puede expresar como muestra la Ec. 2.46.

$$j = \sum_{i=0}^{i=t} \left( e^{\left( 13.65 \cdot \frac{4000}{273+T_i} \right)} \cdot \Delta t_i \right) \quad (2.46)$$

El campo de aplicación de este modelo se extiende entre las temperaturas de 0 °C y 60°C y con cementos con contenidos casi nulos o relativamente reducidos de adiciones (tipos CEM I y CEM II).

Según el Código Modelo CEB-FIP 1990 (CEB-FIP, 1993), simplificadaamente, se puede estimar la evolución de resistencia media a compresión  $f_{cm}$ , a partir de la siguiente expresión:

$$f_{cm,j} = f_{cm,28} \cdot e^{\left( s \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{28}{j}} \right) \right)} \quad (2.47)$$

donde,  $f_{cm,j}$  es la resistencia media a compresión del hormigón a los  $j$  días,  $f_{cm,28}$  la resistencia media a compresión a los 28 días y  $s$  un coeficiente que depende de la velocidad de endurecimiento del cemento ( $s = 0.38$  para cementos de endurecimiento lento,  $s = 0.25$  para cementos de endurecimiento normal y  $s = 0.20$  para cementos de endurecimiento rápido y elevada resistencia inicial).

Para estimar la resistencia característica del hormigón, a partir de la resistencia media a compresión, el Código Modelo CEB-FIP (1990), propone la siguiente expresión:

$$f_{ck} = f_{cm} - \Delta f \quad (2.48)$$

donde,  $f_{ck}$  es la resistencia característica a compresión del hormigón,  $f_{cm}$  la resistencia media a compresión del hormigón y  $\Delta f$  igual a 8 MPa.

Ahora si adoptamos la condición de descimbrado propuesta por Calavera (1981) (Ec. (2.33)), faltaría por determinar la relación que existe entre el desarrollo de la resistencia a tracción del hormigón y la resistencia a compresión. Para ello, las distintas normas, como la norma española EHE o la norteamericana ACI 318 brindan, una relación entre la resistencia característica a tracción ( $f_{ckt}$ ) y la resistencia a compresión de un hormigón ( $f_{ck}$ ) así:

$$f_{ckt} = 0.21 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (\text{EHE}) \quad (2.49)$$

$$f_{ckt} = 0.345 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (\text{ACI}) \quad (2.50)$$

Sin embargo, estas relaciones sólo son válidas para una edad superior a 7 días.

A edades tempranas se pueden emplear las siguientes expresiones obtenidas a partir del tipo de cemento empleado en la mezcla:

Tabla 2.24 Relación  $f_{ckt}(f_{ck})$  para diversos tipos de cementos

	<b>Cemento</b>	<b>Relación <math>f_{ckt}(f_{ck})</math></b>
<b>Expresiones propuestas por Fernández (1986)</b>	P-450 ARI	$f_{ckt} = 0.26 \cdot f_{ck}^{0.77}$
	P-350	$f_{ckt} = 0.07 \cdot f_{ck}^{1.03}$
	PA-350 (Puzolana)	$f_{ckt} = 0.18 \cdot f_{ck}^{0.85}$
	PA-350 (Escoria)	$f_{ckt} = 0.06 \cdot f_{ck}^{1.07}$
<b>Expresión propuesta por Calderón y Adam (2005)</b>	CEM II/A-V 42.5	$f_{ckt} = 0.11025 \cdot f_{ck}^{0.9315}$

Si se considera un nuevo factor  $\beta$ , que compara las cargas de construcción y las cargas de cálculo en servicio, de la ecuación (2.33) se obtiene la siguiente expresión:

$$f_{ckt} \geq \beta \cdot f_{ckt,28} \quad (2.51)$$

donde,

$$\beta = \alpha \cdot \frac{\gamma'_{fg}}{\gamma_{fg}} \quad (2.52)$$

Reemplazando las expresiones que relacionan la resistencia a tracción con la resistencia a compresión del hormigón a edades jóvenes, en la ecuación (2.51) se obtienen las siguientes condiciones de descimbrado:

$$\text{EHE} \quad f_{ck,j} \geq \beta^{1.5} \cdot f_{ck,28} \quad (2.53)$$

$$\text{ACI} \quad f_{ck,j} \geq \beta^2 \cdot f_{ck,28} \quad (2.54)$$

$$\text{Cemento P-450 ARI} \quad f_{ck,j} \geq \beta^{1.3} \cdot f_{ck,28} \quad (2.55)$$

$$\text{Cemento P-350} \quad f_{ck,j} \geq \beta^{0.97} \cdot f_{ck,28} \quad (2.56)$$

$$\text{Cemento PA-350 (Puzolana)} \quad f_{ck,j} \geq \beta^{0.93} \cdot f_{ck,28} \quad (2.57)$$

$$\text{Cemento PA-350 (Escoria)} \quad f_{ck,j} \geq \beta^{1.18} \cdot f_{ck,28} \quad (2.58)$$

$$\text{CEM II/A-V 42.5} \quad f_{ck,j} \geq \beta^{1.07} \cdot f_{ck,28} \quad (2.59)$$

Las curvas de la Figura 2.31 muestran la relación de  $\beta$ , con respecto a la relación entre la resistencia característica del hormigón a la edad de descimbrado, y la resistencia característica del hormigón a 28 días.

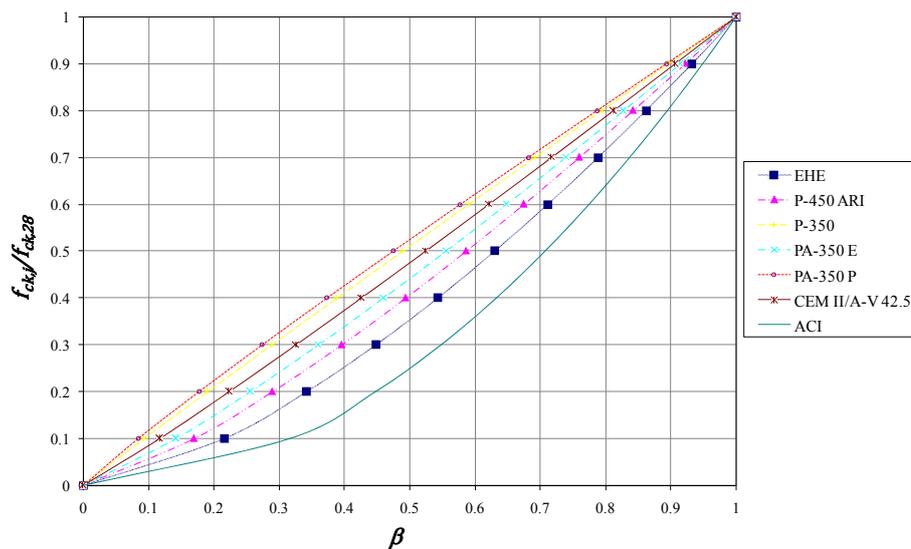


Fig. 2.31 Relación de  $\beta$  con respecto a la relación entre  $f_{ck,j}/f_{ck,28}$

Se observa en la Figura 2.31, que las expresiones de la EHE y de la ACI resultan ser las menos restrictivas de todas, y que sólo las expresiones correspondientes a cementos P-350 y PA-350 Puzolana (cementos de peor calidad, que hoy prácticamente están en desuso en Edificación), son más restrictivas que la expresión correspondiente al cemento CEM II/A-V 42.5, por lo cual, Alvarado et al. (2006) proponen la ecuación (2.59) para determinar la resistencia a compresión necesaria en el momento de descimbrado.

A partir de esta expresión, Alvarado et al. (2006) confeccionaron las curvas de las Figuras 2.32, 2.33 y 2.34, curvas para determinar el plazo de descimbrado en función del tipo de cemento utilizado, de la temperatura media en obra, de la relación entre la carga de cálculo de proyecto y la carga de cálculo de

construcción (Coeficiente  $\beta$ ), para un hormigón con resistencia característica a compresión de 25 MPa.

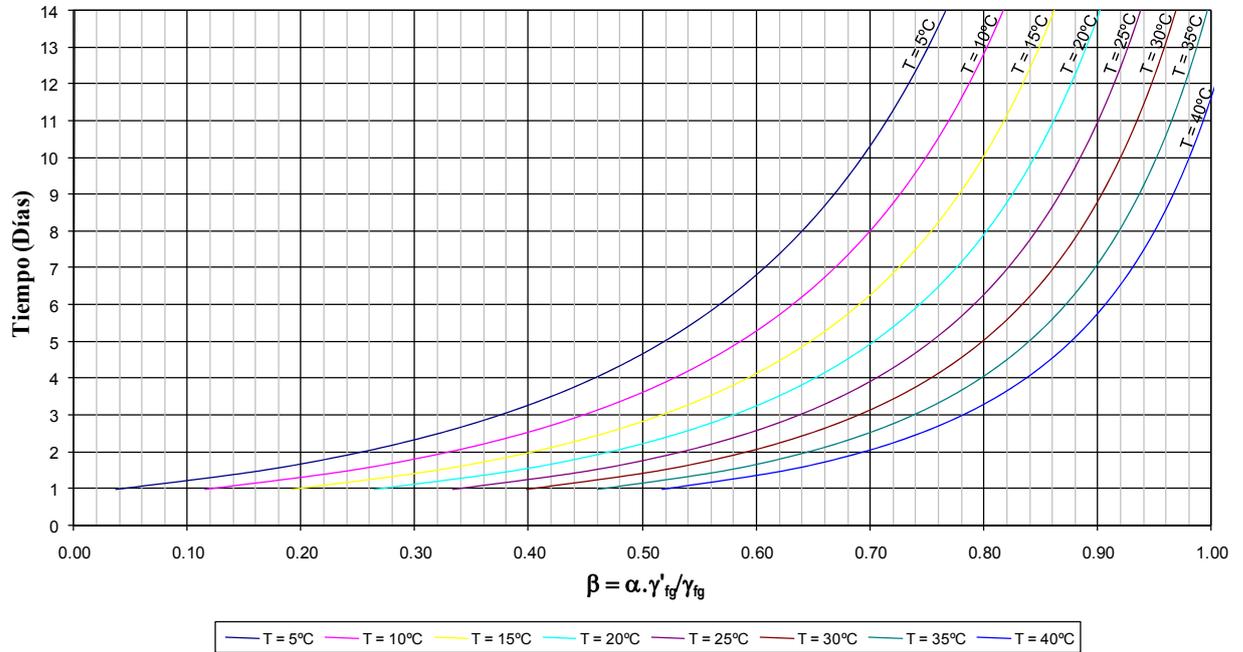


Fig. 2.32 Curvas para determinar el plazo de descimbrado (Hormigón de 25 MPa. y cemento de endurecimiento rápido  $s = 0.20$ )

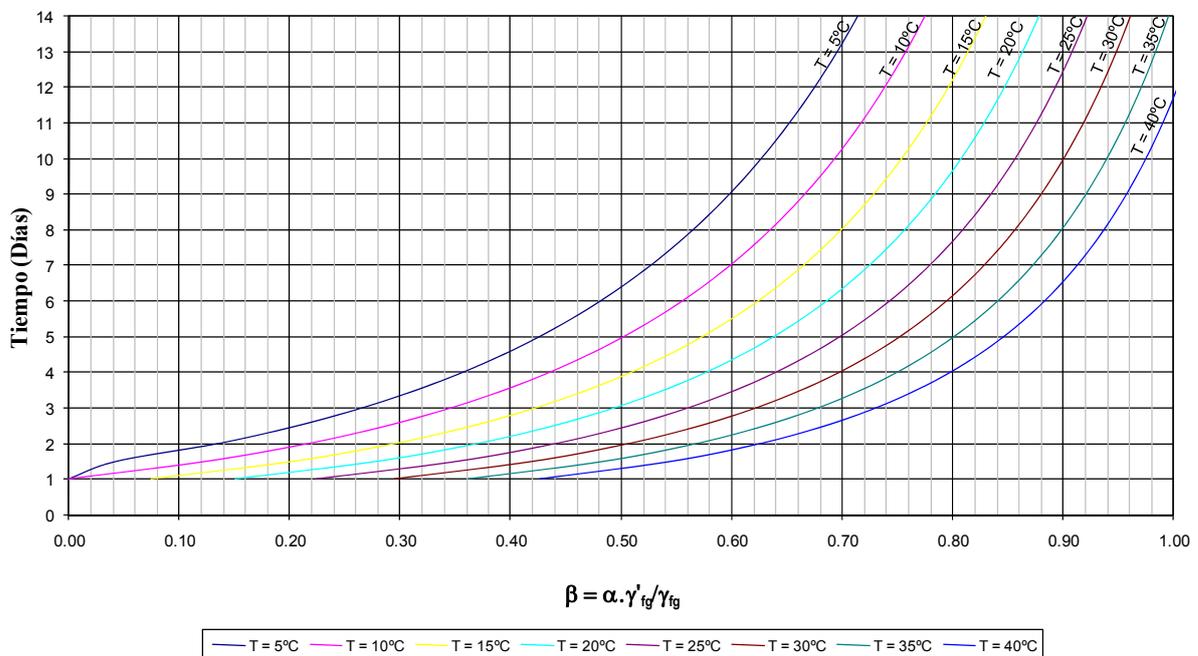


Fig. 2.33 Curvas para determinar el plazo de descimbrado (Hormigón de 25 MPa., y cemento de endurecimiento normal  $s = 0.25$ )

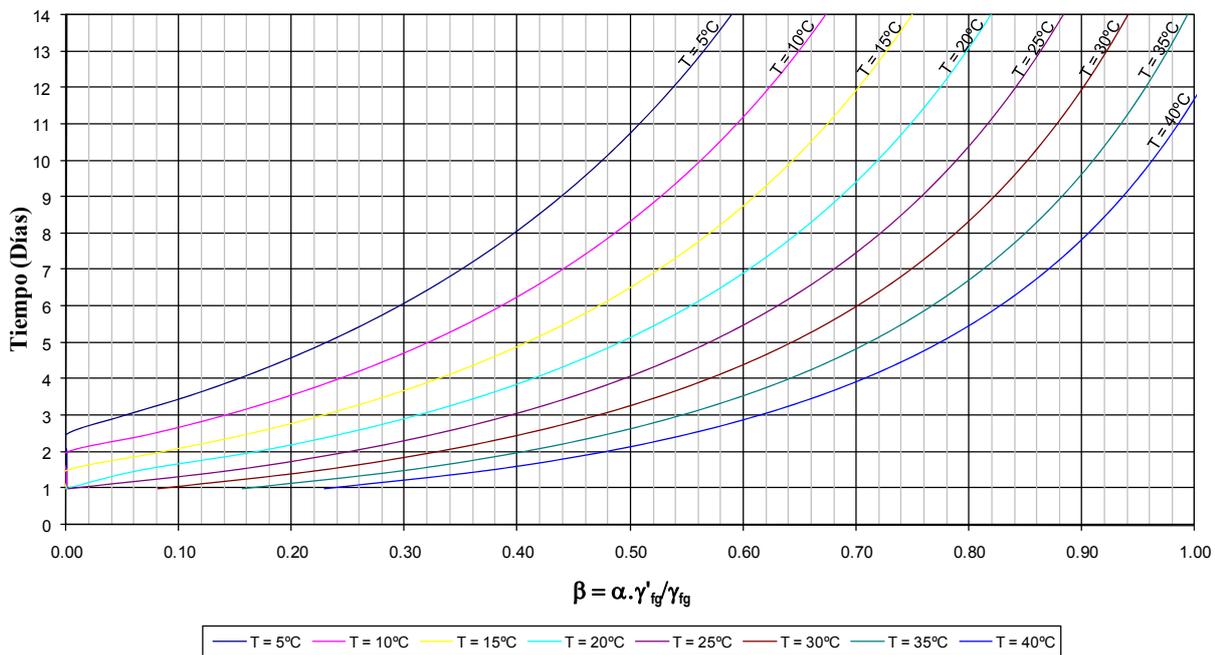


Fig. 2.34 Curvas para determinar el plazo de descimbrado (Hormigón de 25 MPa., y cemento de endurecimiento lento  $s = 0.38$ )

#### 2.4.2.4. Método de Díaz (2008)

Díaz (2008) propone un método para obtener la edad de descimbrado de una pieza de hormigón armado, en función de la sollicitación a la que está sometida. De esta forma genera unas curvas para sollicitaciones de flexión simple, compresión simple, esfuerzo a cortante, y anclaje de armaduras que para diferentes temperaturas permiten establecer la edad de descimbrado.

Díaz (2008) resalta que la característica que marca el plazo de descimbrado es la resistencia a tracción y adherencia del hormigón, al igual que Calavera (1981), e igualmente resalta la necesidad de conocer las curvas de endurecimiento, a diferentes temperaturas, del hormigón empleado en obra.

La Figura 2.35 muestra para la relación  $\frac{P'_d}{P_d}$  siendo,  $P'_d$  la carga de cálculo actuante en el momento de descimbrado y  $P_d$  la carga de cálculo considerada en proyecto, la edad de descimbrado para un hormigón fabricado con cemento P 350, curado a diferentes temperaturas (la curva de endurecimiento se corresponde con las curvas obtenidas por Fernández Gómez (1986), en relación a la evolución de la resistencia a tracción).

#### 2.4.3. Recomendaciones de la normativa para estimar los plazos de descimbrado

Es de señalar que si bien los criterios generales sobre cómo y cuándo descimbrar son coincidentes en todas las normativas, no lo son tanto las recomendaciones prácticas a la hora de establecer los plazos de descimbrado. De igual modo no se definen métodos de cálculo para determinar las cargas sobre los

puntales durante el proceso constructivo, siendo este uno de los resultados que más interesa a los fabricantes y que más afecta los costes en edificación.

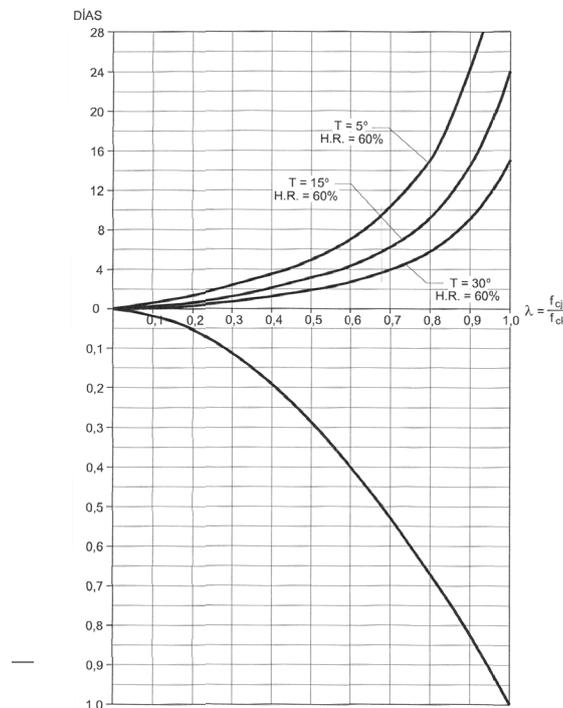


Fig. 2.35 Curva para estimar el plazo de descimbrado en función de la evolución de la resistencia a tracción Díaz (2008)

En el presente apartado se recogen los conceptos propuestos en diferentes normativas en lo referente a los procesos de cimbrado y descimbrado.

#### 2.4.3.1. Instrucción de hormigón estructural (EHE)

La instrucción española (EHE), contempla en su artículo 74 algunas condiciones para las operaciones de descimbrado, desencofrado y desmoldeo.

Dicho documento comenta que dichas operaciones no se realizarán hasta que el hormigón haya alcanzado la resistencia necesaria para soportar, con suficiente seguridad y sin deformaciones excesivas, los esfuerzos a los que va a estar sometido durante y después del desencofrado, desmoldeo o descimbrado.

También recomienda que para obras de importancia y donde no se posea experiencia de casos análogos, se realicen ensayos para estimar la resistencia real del hormigón, como el ensayo de probetas cilíndricas curadas en condiciones de obra o estimando la resistencia del hormigón mediante ensayos destructivos o no destructivos directamente en la estructura.

Adicionalmente, se recomienda que para realizar el descimbrado se deben tener en cuenta por lo menos algunos de los siguientes puntos:

- ✓ El peso del hormigón, especialmente si representa la mayor parte de la carga total de proyecto.
- ✓ Las cargas impuestas, por ejemplo, el cimbrado de otros elementos superiores, las sobrecargas de ejecución, etc.
- ✓ La secuencia de descimbrado y la posible actuación temporal con gatos y soportes temporales.
- ✓ La necesidad de mantener determinados elementos para reducir las deformaciones dependientes del tiempo (por ejemplo, puntales intermedios) o para garantizar la estabilidad de la estructura (por ejemplo, refuerzos contra viento).
- ✓ Operaciones de tesado e inyección.
- ✓ Operaciones particulares de descimbrado, por ejemplo en las partes en ángulo entrante de lo encofrados.
- ✓ Las condiciones ambientales a las que se va a ver sometido el hormigón una vez retirado el encofrado, sobre todo si éste actuaba como sistema de curado.
- ✓ Posibles exigencias de tratamientos superficiales posteriores.

De igual forma, se llama la atención que para definir el plazo mínimo de descimbrado, es necesario verificar no solo la resistencia, sino también el módulo de deformación, en los hormigones jóvenes. A título orientativo para estimar el plazo de descimbrado la EHE propone la siguiente fórmula:

$$j = \frac{400}{\left(\frac{Q}{G} + 0.50\right) \cdot (T + 10)} \quad (2.60)$$

donde,  $j$  es el número de días,  $T$  la temperatura media en grados centígrados de las máximas y mínimas diarias durante los  $j$  días;  $G$  la carga que actúa sobre el elemento al descimbrar (incluido el peso propio) y  $Q$  la carga que actuará posteriormente.

Sin embargo la aplicación de esta fórmula se reduce para elementos de hormigón armado fabricados con cemento portland y en el supuesto de que el endurecimiento se haya llevado a cabo en condiciones ordinarias. Para casos donde no se dispongan suficientes datos y el cemento utilizado sea de endurecimiento normal, la EHE propone los siguientes plazos dependiendo del tipo de elemento a descimbrar o desencofrar:

Tabla 2.25 Periodos mínimos de desencofrado y descimbrado de elementos de hormigón armado según la EHE.

Temperatura superficial del hormigón (°C)	≥ 24°	16°	8°	2°
Encofrado Vertical	9 horas	12 horas	18 horas	30 horas
Losas				
Fondos de encofrado	2 días	3 días	5 días	8 días
Puntales	7 días	9 días	13 días	20 días
Vigas				
Fondos de encofrado	7 días	9 días	13 días	20 días
Puntales	10 días	13 días	18 días	28 días

#### 2.4.3.2. Eurocódigo EC-2 (1992)

El Eurocódigo No. 2 (1992) en el apartado 6.3.2.4. (Retirada de encofrados y andamiajes), establece que los encofrados y cimbras deberán estar diseñados para resistir todas las acciones que se puedan presentar durante el proceso constructivo.

En cuanto al momento en el que se pueden retirar los encofrados y cimbras recomienda tener en cuenta los siguientes criterios:

- ✓ Tensiones que se originan en el hormigón cuando se retira el encofrado y las cimbras.
- ✓ Resistencia del hormigón en el momento de la retirada.
- ✓ Condiciones climatológicas y medidas adoptadas para proteger el hormigón una vez que el encofrado haya sido retirado.

La información general sobre el curado y retirada de encofrados se da en los apartados 10.6, 10.7 y 10.8 de la Norma ENV 206. Haciendo mención en cuanto al momento de retirada del encofrado, que el hormigón deberá haber alcanzado la suficiente resistencia para soportar las cargas a las cuales pueda verse sometido. Sin embargo, el Eurocódigo admite que la retirada del encofrado depende fundamentalmente del desarrollo de la resistencia del hormigón, y del tipo de encofrado utilizado. En ausencia de mayor precisión, recomienda los siguientes períodos mínimos:

- ✓ 2 días para las partes no cargas en el encofrado (por ejemplo: encofrado vertical de vigas, pilares y muros).
- ✓ 5 días para el encofrado de losas hormigonadas in situ.
- ✓ 10 días para encofrados con cargas directas (por ejemplo Tablas de fondo de vigas o losas).

#### 2.4.3.3. ACI 347 (American Concrete Institute, Guide to formwork for concrete) (2001)

El código ACI propone que, partiendo de un análisis racional, se deben considerar algunos factores para determinar el número de forjados cimbrados o recimbrados como resultado de la secuencia de construcción y también determinar las cargas transmitidas entre forjados y cimbras.

El análisis puede considerar entre otros factores los siguientes:

- ✓ Análisis de las diferentes cargas y sobrecargas aplicadas en la estructura.
- ✓ Consideración de la carga permanente del hormigón y del sistema de encofrado.
- ✓ Sobrecargas de construcción incluyendo los trabajos que se realicen sobre el forjado y los acopios de material que se puedan presentar en éste.
- ✓ Resistencia de cálculo del hormigón.
- ✓ El ciclo de tiempo del hormigonado de los forjados sucesivos.
- ✓ Resistencia requerida del hormigón en el momento de apoyo de la cimbra para el hormigonado de forjados superiores.
- ✓ Distribución de las cargas en la estructura y en el sistema de cimbrado, en los momentos de hormigonado, descimbrado, recimbrado y desencofrado.
- ✓ Luces del forjado o de los miembros de la estructura que se encuentran cimbrados.
- ✓ Tipo del sistema de encofrado, dimensiones de los elementos de encofrado.
- ✓ Distribución individual de las cargas por puntal.
- ✓ Mínima edad del hormigón para resistir las cargas de construcción y de cimbras para el hormigonado de forjados superiores.

En cuanto al proceso de ejecución de los procesos de cimbrado y descimbrado, hace un especial énfasis en las precauciones de seguridad, en el cimbrado y descimbrado de la estructura, y en cimbrado y recimbrado de forjados consecutivos.

#### Precauciones de seguridad:

Se hace un especial hincapié en la consideración de la seguridad y fiabilidad de los sistemas de encofrado y de cimbrado utilizados en el proceso constructivo.

El código sostiene que las fallas en los sistemas de encofrado o cimbrado pueden deberse a errores humanos, materiales de los sistemas de encofrado o cimbrado, omisión o un inadecuado diseño. Una cuidadosa supervisión y una continua inspección del encofrado y cimbrado en los procesos de hormigonado y retirada de cimbras y encofrados puede ayudar a prevenir muchos accidentes.

El código ACI exige que los procedimientos de construcción sean adecuadamente planificados para asegurar la seguridad del personal y la integridad final de la estructura. Algunas consideraciones a tener en cuenta entre otras son las siguientes:

- ✓ Seguridad en la construcción, señalización y delimitación de la zona de construcción. Presencia de solo personal autorizado en los tiempos de hormigonado y en el desmonten de sistemas de cimbrado.
- ✓ El uso de elementos de medición avanzados puede ayudar a detectar rápidamente posibles fallas o desplazamientos en el momento de hormigonado de la estructura o del sistema de encofrado.
- ✓ Incorporación de andamios, pasarelas y barandas para una correcta movilización del personal en la obra.
- ✓ Programas de inspección de los sistemas de encofrado y cimbrado de la estructura.

#### Cimbrado:

Para el cimbrado de la estructura el código ACI exige la consideración de los siguientes aspectos:

- ✓ El primer aspecto a tener en cuenta es el plano de apoyo de los puntales. Este plano de apoyo debe garantizar una resistencia suficiente para el correcto funcionamiento de cada uno de los puntales. La superficie de apoyo bien puede ser el suelo o cualquiera de los forjados intermedios y debe garantizar la estabilidad del cimbrado.
- ✓ Los puntales deben ser rectos y no deben presentar ningún tipo de daños rotura o deformación.
- ✓ Finalmente se debe garantizar la estabilidad del sistema de cimbrado para evitar posibles deformaciones por desplazamientos o caída de puntales.

#### Retirada de encofrado y descimbrado:

El código ACI recoge los siguientes criterios para establecer el tiempo de desencofrado y descimbrado:

- ✓ La resistencia del hormigón en el momento del desencofrar y descimbrar podrá determinarse mediante los ensayos de probetas en laboratorio o algunos ensayos del hormigón in-situ. Es de especial importancia que en el momento del hormigonado, queden registrados datos acerca de las

condiciones climatológicas en el momento de la puesta en obra del hormigón así como en las etapas posteriores de fraguado. Dependiendo de estas circunstancias se deberá determinar el mínimo lapso de tiempo para la retirada de encofrados y cimbras.

- ✓ En el proceso de retirada de encofrados y cimbra no se deben apreciar en el hormigón ningún tipo de daños o deformaciones. Encofrados y cimbras no deben ser retirados hasta que elementos como vigas, forjados y muros sean capaces de resistir su peso propio o cualquier tipo de sobrecarga que sea considerada. La retirada de encofrados y cimbras debe ser un proceso seguro y progresivo permitiendo que el hormigón asuma las cargas de una forma gradual y uniforme.
- ✓ En el caso que no se especifique la mínima resistencia del hormigón ni el tiempo mínimo de retirada de encofrados y cimbras se pueden usar los siguientes valores para forjados teniendo en cuenta una temperatura ambiente de 10°C. Es de tener en cuenta que en el caso de usar aditivos acelerantes en el hormigón este tiempo se puede disminuir según consideraciones del director de las obras. Por el contrario en el caso de diferencias grandes de temperatura se deben prolongar estos tiempos.

- 3 m.- de luz libre entre apoyos: 3 días
- 3-6 m. de luz libre entre apoyos: 4 días
- >6 m. de luz libre entre apoyos: 7 días

Es de tener en cuenta que en el caso de usar aditivos acelerantes en el hormigón este tiempo se puede disminuir según consideraciones del director de las obras. Por el contrario en el caso de diferencias grandes de temperatura se deben prolongar estos tiempos.

#### Cimbrado y recimbrado de forjados consecutivos:

Haciendo referencia a la transmisión de cargas durante el proceso constructivo, el código ACI, propone el cimbrado y recimbrado como operaciones para la transmisión de cargas entre forjados recientemente hormigonados estableciendo los siguientes conceptos.

Los sistemas de cimbrado y recimbrado de forjados consecutivos buscan la distribución de cargas de forjados recientemente hormigonados en los forjados inferiores. Estos forjados sin embargo no están diseñados para resistir estos esfuerzos, por esto las cargas deben ser distribuidas en el suficiente número de forjados con el fin de evitar excesos en esfuerzos y deformaciones.

Un método constructivo habitual es el del recimbrado, en donde cada uno de los niveles de recimbrado solo recibe la carga del forjado recién hormigonado y las posibles cargas de construcción que se presenten. El peso de los forjados intermedios es resistido por sí mismos. Se supone un comportamiento elástico de los forjados; esto quiere decir que los forjados interconectados por el recimbrado se comportan de igual forma ante el aumento o disminución de cargas. Realizando esta hipótesis se desprecian los posibles efectos que puedan llegar a tener la retracción y la fluencia del hormigón.

Algunas de las ventajas del recimbrado son:

- La totalidad del sistema de encofrado puede ser retirado en un pequeño lapso de tiempo y ser desplazado a otra área de trabajo.

- Los puntales solo asumen las cargas de construcción debido a que los forjados son capaces de asumir su peso propio.
- La combinación de sistemas de cimbrado y recimbrado suele dar como resultado un menor número de plantas apuntaladas lo que permite adelantos de trabajos en las plantas inferiores.

#### 2.4.3.4. Código modelo CEB-FIP 1990 (1995)

Hace especial énfasis en que las cimbras y encofrados se mantendrán hasta que el hormigón posea la resistencia suficiente para soportar las tensiones y deformaciones a las que pueda estar sometido (con un margen aceptable de seguridad).

Algunos aspectos a tener en cuenta según este código son:

- ✓ El peso de hormigón.
- ✓ Las cargas impuestas, por ejemplo el cimbrado de plantas sucesivas.
- ✓ Secuencia de descimbrado, posible actuación temporal con gatos y soportes temporales.
- ✓ Necesidad de mantener determinados elementos para reducir las deformaciones dependientes del tiempo (por ejemplo, puntales auxiliares), o para garantizar la estabilidad de la estructura (por ejemplo, refuerzos contra viento)
- ✓ Operaciones de tesado e inyección.
- ✓ Operaciones particulares de descimbrado.
- ✓ Condiciones ambientales y posibles medidas para proteger el hormigón una vez retirado el encofrado.

En cuanto a la edad mínima de descimbrado, el código propone tener en cuenta varios factores, tales como la evolución de resistencias, el curado, la deformabilidad o la porción de carga permanente.

El código modelo recomienda en caso de empleo de cemento de endurecimiento normal, para estructuras de hormigón armando los períodos de descimbrado de la Tabla 2.24.

Tabla 2.26 Períodos mínimos de descimbrado, recomendados por el Código modelo

Temperatura superficial del hormigón (°C)	≥ 24°	16°	8°	2°
Encofrado Vertical	9 horas	12 horas	18 horas	30 horas
Losas				
Fondos de encofrado	3 días	4 días	6 días	10 días
Puntales	7 días	10 días	15 días	25 días
Vigas				
Fondos de encofrado	7 días	10 días	15 días	25 días
Puntales	10 días	14 días	21 días	36 días

## 2.5. Conclusiones relativas al estado del arte

Durante la construcción de edificios en altura se hace necesario apoyar la cimbra en forjados inferiores recientemente hormigonados. Estos forjados pueden estar sometidos a solicitaciones de carga superiores a las de servicio, haciendo evidente la necesidad de conocer como se transmiten las cargas entre los forjados y la cimbra.

Para resolver esta incertidumbre, se han desarrollado diversas investigaciones de carácter teórico y experimental explicadas al detalle en el apartado 2.3. En 1963 Grundy y Kabaila propusieron un método simplificado, que incluso actualmente es aplicado para determinar las cargas en puntales y forjados, gracias a su fácil aplicación y al estar, en la mayoría de situaciones, del lado de la seguridad.

Investigaciones posteriores de autores como Liu et al. (1985), Stivaros y Halvorsen (1990), Mosallam y Chen (1991), Moragues et al. (1996) y Díaz (2008) coinciden en que el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963) sobreestima las cargas en puntales, debido a que los considera como elementos infinitamente rígidos. Sin embargo, dichos modelos teóricos requieren de un software de cálculo especializado, lo cual los convierte en métodos de una compleja aplicación práctica. Así, autores como Duan y Chen (1995), Fang et al. (2001) y Beeby (2001), entre otros, han desarrollado modelos teóricos simplificados que permiten estimar las cargas entre puntales y forjados durante el proceso constructivo. Dichos modelos se basan, principalmente, en considerar a los puntales como elementos de rigidez finita y en considerar la ganancia de rigidez del forjado de hormigón con el tiempo.

La validación experimental de dichos modelos teóricos ha sido desarrollada posteriormente e incluso, en la mayoría de los casos, por otros autores. El desarrollo de estos estudios experimentales se ha basado en la instrumentación de edificios durante su construcción midiendo las cargas en los puntales. Esto implica que la toma de datos sea una tarea compleja, debido a que se requiere adaptar toda la organización y control que requiere un estudio experimental al ritmo de la obra. Se destacan las mediciones experimentales realizadas por Agarwal y Gardner (1974), Moragues et al. (1992), Rosowsky et al. (1997), Fang et al. (2001) y Puente et al. (2007).

En este punto es importante resaltar que la mayoría de investigaciones acerca de la transmisión de cargas entre forjados y puntales, tanto teóricas como experimentales, han estudiado el proceso de CD y el proceso de CRD, siendo Moragues et al. (1996) el único que hasta la fecha ha estudiado el proceso de CCD. Esto pese a que dicho proceso es de uso habitual en España. En las investigaciones de Moragues et al. (1992), se concluye que al realizar el clareado los forjados comienzan a soportar una fracción importante de la carga que actúa sobre éstos.

Establecer las solicitaciones de carga para los forjados, durante el proceso constructivo, obliga a comprobar la edad para la cual estos forjados tendrán la resistencia suficiente para asumir dichas cargas sin afectar negativamente su seguridad, funcionalidad y durabilidad. Así, autores como Calavera (1981), Fernández (1986) y Alvarado et al. (2006) adoptan metodologías basadas en la evolución de la resistencia a tracción y en la relación entre las cargas de construcción y las cargas de servicio para determinar la edad de descimbrado de un forjado. Otra metodología más rigurosa es planteada por Marí (1995), que consiste en determinar, para cada uno de los estados límites, las características mecánicas que debe presentar el hormigón a fin de que dicho estado límite quede satisfecho, tanto en el momento de descimbrado como durante la vida útil de la estructura.

Llegado este punto se plantea la necesidad de conocer cómo se distribuyen las cargas entre forjados y puntales durante la construcción de estructuras donde se realiza la operación de clareado. Dicha distribución, debe ser analizada a partir de un análisis experimental y un análisis teórico. El estudio experimental debe permitir recoger el número de variables suficientes para, posteriormente, calibrar y

validar un modelo teórico que mediante la aplicación del método de los elementos finitos permita representar, con la mayor precisión posible, el proceso de CCD. Una vez validado el modelo teórico, es necesario evaluar la posible aplicación de los métodos simplificados para estimar la distribución de cargas, en forjados y puntales, para un proceso de cimbrado, clareado y descimbrado.

## **CAPITULO 3. PLANTEAMIENTO DEL MODELO EXPERIMENTAL**

### **3.1. Introducción**

Con el objeto de estudiar la transmisión de cargas entre puntales y forjados en un proceso de cimbrado, clareado y descimbrado, en las instalaciones de ICITECH de la Universidad Politécnica de Valencia, se planteó un estudio experimental en el que se construyó una estructura de un edificio a escala real.

El estudio experimental se planteó como un ensayo a escala real. En este caso la obra se adapta a las exigencias del ensayo y no al revés, alejándose de la gran complejidad que implica adaptar las exigencias de organización y control que requiere un ensayo experimental a los ritmos y procesos en obra. Esto permite aumentar el número y calidad de variables controladas y, hasta cierto punto, aislar los efectos de cada una de ellas.

Así, se pretende con el modelo experimental comprender la influencia que tienen aspectos como la evolución de propiedades del hormigón, las deformaciones del forjado y de la cimbra, operaciones intermedias habituales como el clareado de puntales y la temperatura de curado del hormigón, entre otros, sobre la transmisión de cargas entre forjados y puntales durante las diferentes etapas de construcción.

El modelo experimental consistió en 3 forjados resueltos mediante una losa de hormigón armado de 25 cm. de canto, siendo la luz entre pilares de 6.00 m. Los forjados se sostienen sobre cuatro pilares de sección rectangular y tienen un voladizo de 1.80 m. La altura entre plantas es de 2.88 m. El proceso constructivo planteado se basa en mantener dos plantas consecutivas apuntaladas, y adicionalmente en el forjado 3 se aplicó una carga similar al peso propio de otro forjado, buscando simular tres plantas consecutivas apuntaladas.

La construcción del edificio experimental se inició el 30 de Octubre de 2006 con el replanteo de la losa de cimentación y finalizó el 22 de Diciembre de 2006 con la prueba de carga en el tercer forjado.

Por otro lado, la medición de las cargas en el sistema de apuntalamiento se inició el día 28 de Noviembre de 2006 (correspondiente al día de hormigonado del primer forjado) y terminó el día 23 de Diciembre de 2006 (correspondiente al descimbrado del segundo forjado).

En este capítulo se pretende describir el modelo experimental, el proceso constructivo empleado, y los recursos de instrumentación y de registro de los datos.

### 3.2. Descripción de la estructura

El experimento realizado ha consistido en la construcción de una estructura de un edificio a escala real. Dicho modelo se construyó en la Universidad Politécnica de Valencia, contiguo a las instalaciones del laboratorio de ICITECH.

Se diseñó una estructura de hormigón armado compuesta de planta baja y tres forjados con las siguientes características:

- ✓ Cimentación. Dadas las condiciones del terreno de cimentación y, con el objeto de materializar un apoyo de los puntales que sostendrán a la cimbra durante el hormigonado de los forjados lo más rígido posible, se ha proyectado una losa de hormigón armado de 40 cm de canto. Esta losa tiene planta rectangular de lados 10,20 m y 9,375 m.
- ✓ Forjados F+01 a F+03. Estos forjados se resuelven mediante una losa de hormigón armado de 25 cm. de canto, siendo la luz entre pilares de 6,00 m. Los forjados se sostienen sobre cuatro pilares de sección rectangular y tienen un voladizo en dos de sus cuatro lados de 1,825 m. De esta forma se simula un vano que está entre un vano extremo y un vano aislado. La altura entre plantas es de 3,00 m. La geometría y el número de plantas están condicionadas al presupuesto de la investigación, aunque dichas características permiten estudiar un gran número de pasos constructivos. La Figura 3.1 muestra una vista tridimensional del edificio.

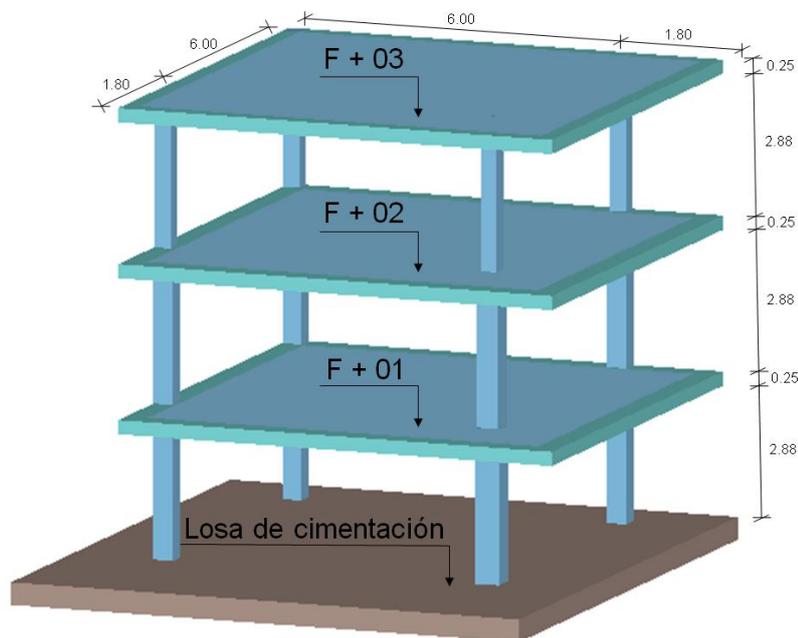


Fig. 3.1 Vista 3D del edificio proyectado

#### 3.2.1. Materiales

Los materiales empleados en la construcción del edificio se describen a continuación:

- ✓ El hormigón de los forjados y de la losa de cimentación: HA-25/B/20/I y presentará, por tanto, las siguientes características:
  - Resistencia característica a compresión: 25 MPa.
  - Consistencia: Blanda.
  - Tamaño máximo de árido: 20 mm.
  - Clase general de exposición: I (interior de edificios).
- ✓ Acero para armar: B-500-S.

Se ha adoptado una clase de exposición tipo I y no tipo IIIa como correspondería a una estructura expuesta a la intemperie y a menos de 5 Km. de la costa por el carácter provisional del edificio proyectado.

### 3.2.2. Terreno de cimentación

Se ha adoptado una tensión admisible para el terreno de cimentación de 100 KN/m<sup>2</sup>. Asimismo se ha considerado un coeficiente de balasto de 3000 KN/m<sup>3</sup>. Estos valores se han extraído de estudios geotécnicos y de la experiencia de obras similares realizadas en la zona.

### 3.2.3. Coeficientes de seguridad

Tanto en los estados límites de servicio como en los estados límites últimos, se han adoptado los coeficientes de mayoración de acciones recogidos por la Instrucción de Hormigón Estructural EHE (Ministerio de Fomento, 1998) en sus artículos 12.1 y 12.2 respectivamente, que coinciden con los incluidos en gran número de normativas (por ejemplo el Eurocódigo No. 2). A su vez, las acciones se han combinado según lo indicado en los Artículos 13.2 y 13.3 de la citada normativa. Para el caso de sobrecargas aplicadas durante el proceso de construcción el coeficiente de mayoración de cargas adoptado ha sido de 1.25.

Por otra parte, tanto para el hormigón como para el acero para armar se adoptarán los coeficientes parciales de seguridad incluidos en el Art. 15 de la EHE y que se transcriben en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Coeficientes parciales de seguridad de los materiales

	Hormigón $\gamma_c$	Acero $\gamma_s$
Coef. Seg.	1.50	1.15

### 3.2.4. Acciones

El valor de las acciones de los forjados 1 y 2 se definió para un uso como parking de camiones. Para el caso del forjado 3 las acciones se definieron para la formación de una cubierta transitable. A continuación se define el valor de dichas acciones:

- ✓ Cargas permanentes: evaluadas a partir del peso propio de los elementos de hormigón considerando un peso específico para el mismo de 25 KN/m<sup>3</sup>.

- ✓ Sobrecargas de uso: 4 kN/m<sup>2</sup> en la planta baja, 10 kN/m<sup>2</sup> en los forjados F+01 y F+02 y 4 kN/m<sup>2</sup> en F+03. Se ha realizado el cálculo considerando alternancia de las sobrecargas de uso.

### **3.2.5. Cálculos estructurales**

El proceso general de cálculo aplicado en el análisis de la estructura es el establecido en la norma EHE y conocido por el nombre de los estados límites (proceso de cálculo que coincide con un amplio número de normas internacionales). Dicho cálculo trata de reducir a un valor suficientemente bajo la probabilidad, siempre existente, de que sean alcanzados una serie de estados límites, entendiendo como tales aquellos estados o situaciones de la estructura o de una parte de la misma, tales que, de alcanzarse, ponen la estructura fuera de servicio.

En primer lugar se establece una geometría inicial de la estructura que se ha sometido a las acciones consideradas en el proyecto; obtenidos los esfuerzos y deformaciones que originan las mismas mediante un análisis matricial, se procede a comprobar que los mismos pueden ser soportados con un dimensionamiento razonable y lógico de armaduras y que las deformaciones no superan los valores considerados como admisibles en la normativa vigente. Si la geometría inicialmente elegida no responde a las consideraciones expuestas, debe procederse a su corrección y a un nuevo cálculo.

Señalamos que el análisis de la estructura se basa en un cálculo matricial espacial-global de tipo lineal, discretizando la misma en elementos tipo barra, partiendo de la geometría de los pilares y las losas de sus forjados. No se adjuntan los listados de cálculo por su tamaño.

Los planos de replanteo, armado y detalles del edificio, se incluyen en el apéndice I.

## **3.3. Estimación del plazo de operaciones de hormigonado, clareado y descimbrado**

Establecer el plazo de las operaciones de hormigonado, clareado y descimbrado de un forjado, supone verificar que este es capaz de resistir las acciones a las cuales va a estar sometido durante el proceso constructivo.

Durante la construcción del edificio experimental se planteó aplicar un proceso de cimbrado, clareado y descimbrado. En la bibliografía analizada, solo Moragues et al. (1996), analizan la influencia que el clareado tiene en la transmisión de cargas entre puntales y forjados.

En el presente apartado, se aplicarán el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963), y los coeficientes de carga propuestos por Moragues et al. (1996), para evaluar las cargas que se presentan durante la construcción del edificio experimental. Es de aclarar que la aplicación del método simplificado (Grundy y Kabaila, 1963) obedece a lo extendido de su uso, ya que no considera la fase intermedia de clareado.

Una vez obtenidas las solicitaciones de carga en los forjados, aplicando la técnica de la madurez del hormigón, se estimaran los periodos mínimos para ejecutar cada una de las operaciones constructivas.

### 3.3.1. Datos de partida

A continuación se muestran los datos de partida necesarios para estimar el plazo de las operaciones de hormigonado, clareado y descimbrado del edificio:

- ✓ Geometría del forjado. Forjado de losa maciza de hormigón armado, con un canto de 25 cm.
- ✓ Materiales. Se prevé emplear en la obra un hormigón de las siguientes características:

Peso específico del hormigón armado,  $\gamma_h = 25 \text{ kN/m}^3$

Tipo de cemento, Cemento de Endurecimiento Normal.

Resistencia característica,  $f_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$ .

- ✓ Acciones en construcción. Sobre el forjado actuarán en la etapa de construcción las siguientes acciones:

Peso propio	6.25 kN/m <sup>2</sup>
<u>Sobrecarga de construcción</u>	<u>1.75 kN/m<sup>2</sup></u>
TOTAL	8.00 kN/m <sup>2</sup>

El valor de la sobrecarga de construcción ha sido determinado considerando una sobrecarga debida a proceso constructivo de 1.00 kN/m<sup>2</sup> (según el artículo 16 de la EFHE (Ministerio de Fomento, 2002), y 0.75 kN/m<sup>2</sup> como el peso aproximado del sistema de apuntalamiento.

- ✓ Acciones en servicio. Sobre el forjado actuarán en servicio las siguientes acciones:

Forjados 1 y 2:

Peso propio	6.25 kN/m <sup>2</sup>
<u>Sobrecarga de uso</u>	<u>10.00 kN/m<sup>2</sup></u>
TOTAL	16.25 kN/m <sup>2</sup>

Forjado 3:

Peso propio	6.25 kN/m <sup>2</sup>
<u>Sobrecarga de uso</u>	<u>4.00 kN/m<sup>2</sup></u>
TOTAL	10.25 kN/m <sup>2</sup>

- ✓ Coeficientes de mayoración de acciones en servicio. Se supone un control de ejecución Intenso. Para este nivel de control la EHE considera los siguientes coeficientes de seguridad:

Coeficiente de mayoración de acciones permanentes:  $\gamma_G = 1.35$

Coeficiente de mayoración de acciones variables:  $\gamma_Q = 1.50$

- ✓ Coeficientes de mayoración de acciones en construcción. Considerando que se trata de una etapa transitoria, la EHE permite que el factor de mayoración de acciones durante la etapa de construcción ( $\gamma'_{fg}$ ), pueda reducirse, no siendo menor a 1.25. La EHE no propone el valor del coeficiente de mayoración de acciones, sin embargo estos dependen del nivel de control durante la

construcción, de esta forma según propuesta de Alvarado et al. (2006) se aceptan los siguientes valores dependientes del nivel de control de ejecución:

$$\gamma'_{fg} = 1.25 \quad \text{Para obras con un control de ejecución Intenso.}$$

$$\gamma'_{fg} = 1.35 \quad \text{Para obras con un control de ejecución Normal.}$$

$$\gamma'_{fg} = 1.40 \quad \text{Para obras con un control de ejecución Reducido.}$$

Se supone un control de ejecución intenso, adoptando como coeficiente de seguridad durante la construcción 1.25.

- ✓ El proceso constructivo consiste en mantener dos plantas consecutivas apuntaladas, y adicionalmente en el forjado 3 aplicar una carga similar al peso propio de otro forjado, buscando simular tres plantas consecutivas apuntaladas.
- ✓ Se considera que durante la construcción del edificio la temperatura media estará alrededor de los 10°C, según datos consultados en la Agencia Española de Meteorología (consultado en la página web [www.aemet.es](http://www.aemet.es)).

### 3.3.2. Condición

Como condición de descimbrado se ha adoptado a partir del estudio realizado por Calavera (1981), la condición propuesta por Alvarado et al. (2006), de la siguiente forma:

Condición de descimbrado:

$$f_{ck,j} \geq \beta^{1.07} \cdot f_{ck,28} \quad (3.1)$$

siendo  $\beta$ , para el edificio planteado:

$$\beta = \frac{\gamma'_{fg} \cdot P'_d}{\gamma_G \cdot G + \gamma_Q \cdot Q}$$

$$\beta = \frac{1.25 \cdot P'_d}{1.35 \cdot 6.25 + 1.50 \cdot 10.00} \quad \beta = 0.053 \cdot P'_d \quad \text{Forjados 1 y 2} \quad (3.2)$$

$$\beta = \frac{1.25 \cdot P'_d}{1.35 \cdot 6.25 + 1.50 \cdot 4.00} \quad \beta = 0.087 \cdot P'_d \quad \text{Forjado 3}$$

Faltaría por definir la carga de construcción ( $P'_d$ ) para cada uno de los forjados en cada una de las fases del proceso constructivo.

### 3.3.3. Estimación de cargas método simplificado (Grundy y Kabaila, 1963)

Aplicando el método simplificado de Grundy y Kabaila para obtener las cargas de construcción en cada uno de los forjados, se obtienen los coeficientes  $\beta$  (Tabla 3.2), y así en la Figura 3.2 para una temperatura media en obra de 10°C se obtienen los plazos mínimos de descimbrado.

Tabla 3.2 Cargas estimadas aplicando el método simplificado

Operación	Nivel	Carga Construcción ( $P'_d$ ) kN/m <sup>2</sup>	Coficiente $\beta$	Plazo mínimo de la operación (días)
Hormigonado forjado 1	1	-	-	-
Hormigonado forjado 2	2	-	-	-
Hormigonado forjado 1	1	-	-	-
Descimbrado forjado 1	2	8.00	0.42	5 días
Descimbrado forjado 1	1	8.00	0.42	5 días
Hormigonado forjado 3	3	-	-	-
Hormigonado forjado 3	2	12.00	0.64	8 días
Hormigonado forjado 3	1	12.00	0.64	8 días
Carga en forjado 3	3	2.08	0.18	2 días
Carga en forjado 3	2	14.08	0.75	13 días
Carga en forjado 3	1	14.08	0.75	13 días
Descimbrado forjado 2	3	5.10	0.44	4 días
Descimbrado forjado 2	2	17.12	0.91	27 días

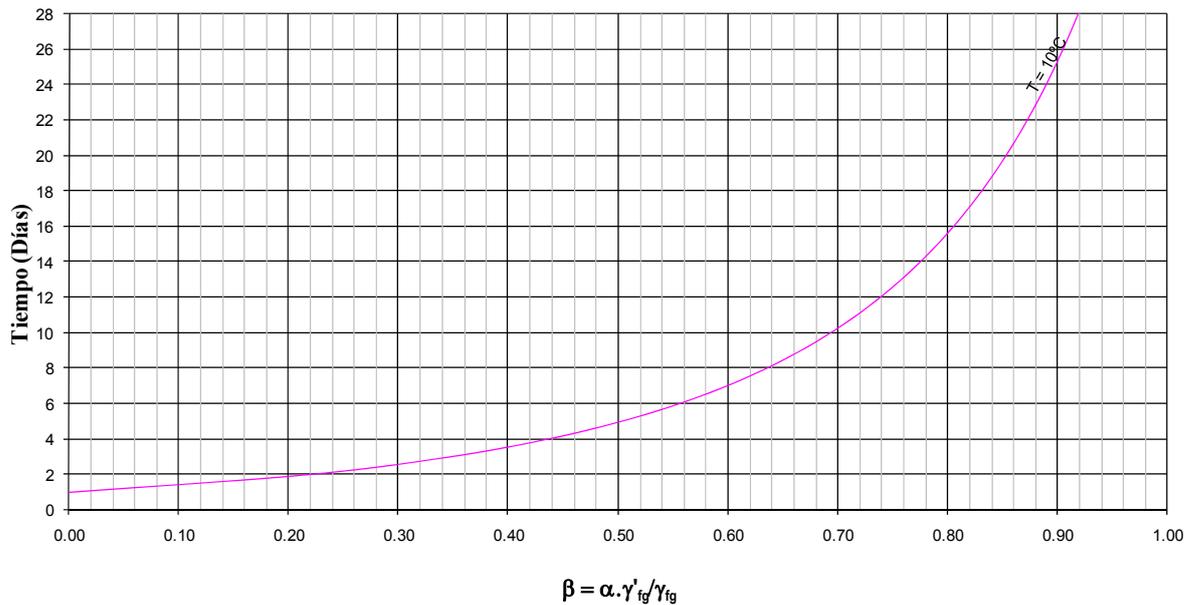


Fig. 3.2 Curva para determinar el plazo de descimbrado (Hormigón de 25 MPa., y cemento de endurecimiento normal  $s = 0.25$ )

En el caso de los forjados 2 y 3, la carga obtenida con el método simplificado es superior que la carga de servicio para la cual el forjado está calculado, esto obligaría a realizar para estos dos forjados un proceso intermedio como lo es el recimbrado.

### 3.3.4. Estimación de cargas coeficientes de Moragues et al. (1992, 1994)

Como ya se menciona anteriormente, Moragues et al. (1992, 1994), han estudiado la influencia que la técnica del clareado tiene durante el proceso constructivo. A partir de un estudio experimental y del desarrollo de un modelo en elementos finitos en dos dimensiones, los autores, proponen unos coeficientes considerando la fase intermedia del clareado (véase el apartado 2.3.1.7).

Así en la Tabla 3.3 se obtienen los coeficientes  $\beta$  y aplicando la técnica de la madurez se pueden estimar los plazos de descimbrado (fig. 3.2).

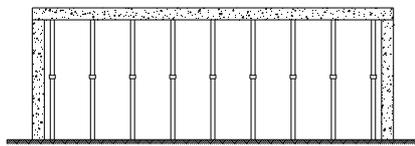
Tabla 3.3 Cargas estimadas aplicando coeficientes de Moragues et al. (1996)

Operación	Nivel	Carga Construcción ( $P'_d$ ) kN/m <sup>2</sup>	Coefficiente $\beta$	Plazo mínimo de la operación (días)
Hormigonado forjado 1	1	-	-	-
Clareado forjado 1	1	2.64	0.14	2 días
Hormigonado forjado 2	2	-	-	-
Clareado forjado 2	1	6.88	0.37	4 días
Clareado forjado 2	2	2.64	0.14	2 días
Clareado forjado 2	1	4.88	0.26	3 días
Descimbrado forjado 1	2	5.36	0.28	3 días
Descimbrado forjado 1	1	10.64	0.56	6 días
Hormigonado forjado 3	3	-	-	-
Hormigonado forjado 3	2	10.96	0.58	8 días
Hormigonado forjado 3	1	13.04	0.69	10 días
Clareado forjado 3	3	2.40	0.22	3 días
Clareado forjado 3	2	8.80	0.47	5 días
Clareado forjado 3	1	12.80	0.68	10 días
Carga en forjado 3	3	6.28	0.58	7 días
Carga en forjado 3	2	10.28	0.55	6 días
Carga en forjado 3	1	13.74	0.73	12 días
Descimbrado forjado 2	3	8.17	0.75	13 días
Descimbrado forjado 2	2	14.12	0.75	13 días

### 3.4. Proceso constructivo

A partir de las estimaciones de carga obtenidas aplicando los coeficientes propuestos por Moragues et al. (1996), y buscando representar las condiciones habituales de construcción en España, en cuanto a medios y plazos para ejecutar edificios en altura, se estableció el siguiente proceso constructivo:

- ✓ Cimentación: construcción de una losa de cimentación, incluyendo cuatro soportes de hormigón armado, con la geometría y armados que indican los planos de la estructura (véase apéndice I).
- ✓ Día “0”: una vez hormigonada la losa de cimentación y los pilares de la planta baja, se instaló el sistema de cimbrado y encofrado para el hormigonado del primer forjado (véase Fig. 3.3).

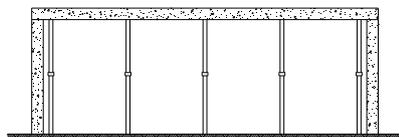


t = 0 días  
Hormigonado 1º Forjado



Fig. 3.3 Proceso constructivo día "0"

- ✓ Día "3": al cabo de tres días de hormigonado del primer forjado, se procedió a la retirada de fondos de encofrado y al clareado de puntales (véase Fig. 3.4). A partir del día "3", se inició la ejecución de los pilares de la primera planta y la instalación del sistema de encofrado y cimbrado del segundo forjado.

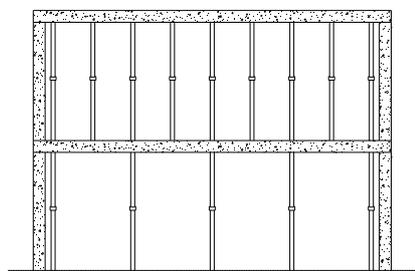


t = 3 días  
Clareado 1º Forjado



Fig. 3.4 Proceso constructivo día "3"

- ✓ Día "7": una vez preparado el sistema de encofrado y cimbrado de la segunda planta se ejecutó su hormigonado (véase Fig. 3.5).

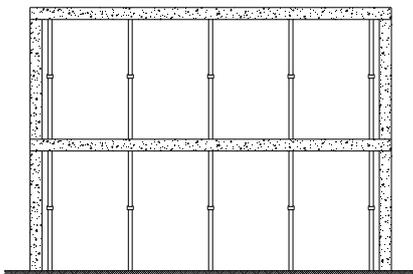


t = 7 días  
Hormigonado 2º Forjado



Fig. 3.5 Proceso constructivo día "7"

- ✓ Día “13”: transcurridos seis días de hormigonado del segundo forjado, se retiraron los fondos de encofrado y se realizó el clareado de puntales (véase Fig. 3.6).

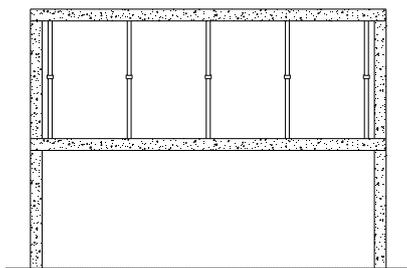


t = 10 días  
Clareado 2º Forjado



Fig. 3.6 Proceso constructivo día “8”

- ✓ Día “14”: en esta fase se procedió al descimbrado total de la primera planta (véase Fig. 3.7).

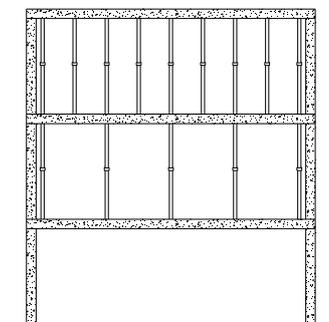


t = 14 días  
Descimbrado 1º Forjado



Fig. 3.7 Proceso constructivo día “14”

- ✓ Día “17”: una vez instalado el sistema de encofrado y cimbrado se procedió a hormigonar el tercer forjado (véase Fig. 3.8).



t = 17 días  
Hormigonado 3º Forjado



Fig. 3.8 Proceso constructivo día “17”

- ✓ Día “20”: en esta fase se procedió al clareado de puntales de la tercera planta (véase Fig. 3.9).

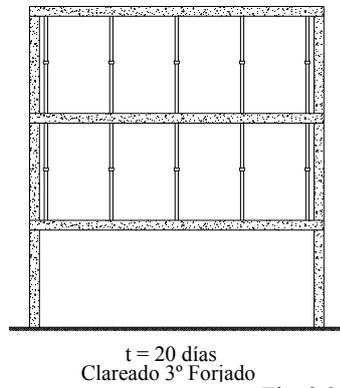


Fig. 3.9 Proceso constructivo día “20”

- ✓ Día “24”: con el fin de simular un ciclo de construcción con tres juegos de puntales, en la tercera planta se aplicó una carga correspondiente a unos  $4.0 \text{ kN/m}^2$ , mediante el uso de balsas de agua (véase Fig. 3.10).

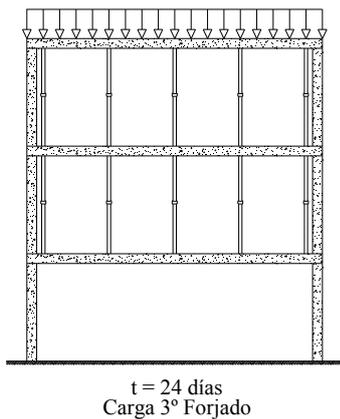


Fig. 3.10 Proceso constructivo día “24”

- ✓ Día “25”: se efectuó el descimbrado total de la segunda planta (véase Fig. 3.11).

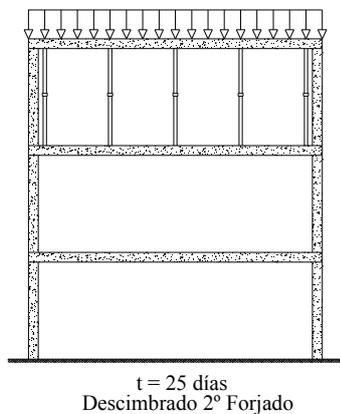


Fig. 3.11 Proceso constructivo día “25”

✓ Finalizado el ensayo, se retiraron las balsas de agua, y se procedió a la demolición de la estructura.

### 3.5. Descripción del sistema de cimbrado

Para el cimbrado de la estructura se empleó el sistema Alumecono suministrado por la empresa Encofrados J. Alsina S.A. El sistema Alumecono está formado por puntales, sopandas principales, sopandas secundarias, portasopandas y tableros de encofrado. Este sistema permite realizar la operación de clareado manteniendo siempre apuntalado el forjado. A continuación se describirá cada uno de los componentes del sistema de cimbrado empleado en la construcción del edificio experimental.

#### 3.5.1. Puntales

Alsina dispone de puntales telescópicos con medidas comprendidas entre 1 y 6 m. El puntal empleado para el presente estudio fue el correspondiente a una altura máxima de 4 m. Este puntal está fabricado con un tubo de acero de alta calidad S275JR (ST-44). Las bases, la rosca y el pasador son también de acero, y el cuerpo y la caña del puntal están pintados con pintura de poliéster (véase Fig. 3.12). Las características geométricas y de resistencia del puntal empleado se muestran en las Tablas 3.4 y 3.5 respectivamente.

Tabla 3.4 Características geométricas del puntal empleado en el estudio experimental

Tipo de puntal	Longitud del cuerpo (m)	Diámetro del cuerpo (mm)	Espesor cuerpo (mm)	Diámetro caña (mm)	Espesor caña (mm)	Peso (Kg)
Puntal 4 m.	1.88	48	2	41	2.5	11.25

Tabla 3.5 Resistencia del puntal según la altura de uso

Altura mínima 2.45 m.	Altura 3.20 m.	Altura máxima 4.00 m.
1750 Kg	1200 Kg	870 Kg



Fig. 3.12 Puntal empleado en el estudio experimental

### 3.5.2. Sopandas principales

Las sopandas principales se componen de vigas de acero de sección prácticamente rectangular y de longitudes de 3 m, siendo necesario empalmar 3 sopandas debido a las dimensiones del forjado (véase Fig. 3.13). Los tableros de encofrado se apoyan sobre basculantes enganchados a la sopanda que permiten retirar dichos tableros, manteniendo así siempre el contacto entre sopandas y el forjado de hormigón. Las sopandas principales están distanciadas entre sí 2 metros (longitud del tablero) aunque se dispongan sopandas intermedias entre ellas. Su posición en los tres forjados es indicada en la Figura 3.15.

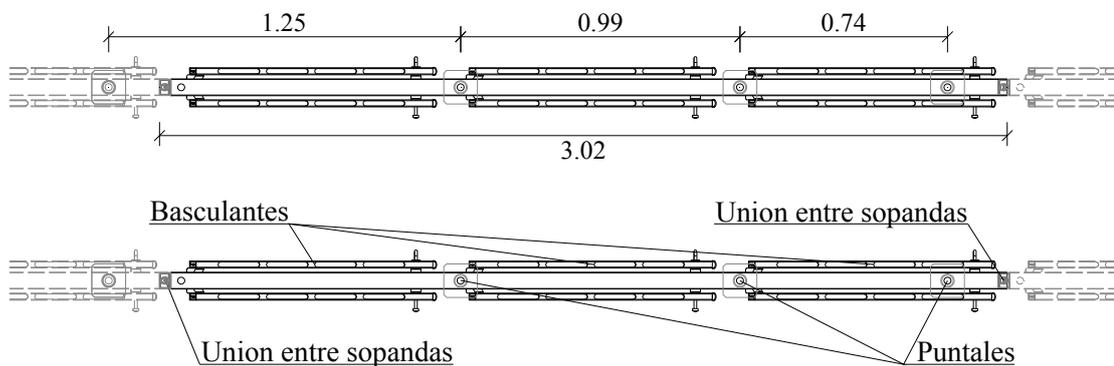


Fig. 3.13 Descripción de las sopandas principales

### 3.5.3. Sopandas intermedias

Su sección y dimensiones son iguales a la de las sopandas principales, pero los tableros apoyan sobre ellas de forma directa, sin ningún elemento intermedio como los basculantes. Su disposición en el forjado es la indicada en la Figura 3.15.

### 3.5.4. Basculantes

Apoyan sobre las sopandas principales en dos puntos separados entre sí 82 cm. El primero de los apoyos recae sobre un puntal mientras que el segundo se realiza mediante un pasador de acero situado a 18 cm del siguiente puntal. Estos elementos son los que permiten la retirada de los tableros de fondo de encofrado manteniendo los puntales y las sopandas principales (véase Fig. 3.14). Están fabricados en aluminio, siendo su sección rectangular, de 2.5 x 5.0 cm y su longitud de 86 cm.

### 3.5.5. Tableros de encofrado

Los tableros de encofrado son de madera de 0.50 m de ancho, 2 m de largo y 27 mm de espesor.

### 3.5.6. Portasopandas

Son elementos que sirven de guía para el conjunto de sopandas principales y secundarias. Las portasopandas no cumplen ninguna función resistente.



Fig. 3.14 Extracción del basculante de las sopandas principales

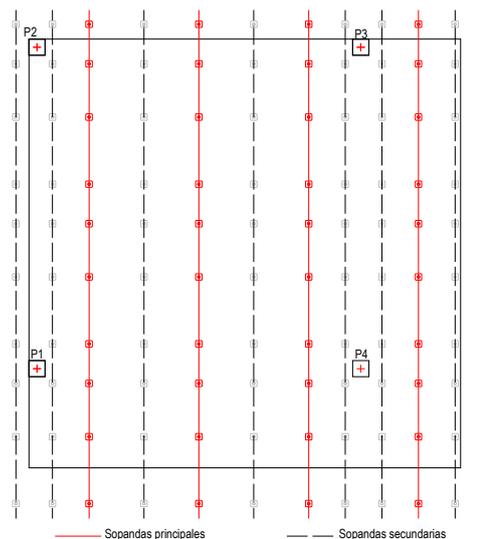


Fig. 3.15 Distribución de sopandas principales y secundarias en los forjados

## 3.6. Instrumentación

La instrumentación se dividió en tres componentes principales, la instrumentación de puntales, la medida de temperatura del hormigón de los forjados y la instalación de pértigas con captadores de desplazamiento bajo los forjados una vez clareados.

### 3.6.1. Puntales

Se instrumentaron 80 puntales con tres bandas extensométricas en cada uno de ellos, para conocer exactamente los esfuerzos a los que estaban sometidos en cada una de las fases de construcción de la estructura. Se dispusieron tres bandas extensométricas, en un mismo nivel para cada puntal, con el fin

de compensar de una forma correcta el efecto de la deformación por flexión del puntal. Adicionalmente 3 puntales fueron utilizados como referencia, con el objeto de medir el efecto de la temperatura ambiente sobre: los puntales, las galgas extensométricas y el equipo de adquisición de datos. Sobre estos puntales no se impuso ningún tipo de coacción en sus extremos, por lo que no formaron parte del sistema de cimbrado del edificio.

Partiendo de que todos los elementos que constituyen el sistema proceden de casas especializadas se ha supuesto que sus características mecánicas deben ser muy uniformes. Este hecho se comprobó mediante ensayos preliminares en los que se ha medido la relación carga-acortamiento de distintos puntales, obteniendo resultados muy homogéneos (véase apartado 3.7.1).

### 3.6.1.1. Proceso de instrumentación

El proceso de instrumentación de cada puntal se describe a continuación:

- ✓ Pulido de la superficie del puntal: Se hizo necesario retirar la pintura que tiene el puntal, dejando al descubierto el acero donde posteriormente se pegaran las bandas extensométricas (véase Fig. 3.16).

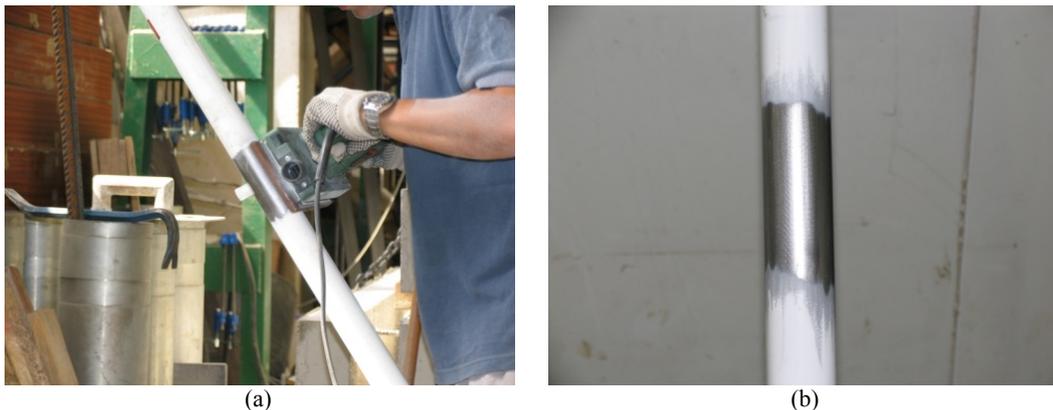


Fig. 3.16 Proceso de pulido de puntales (a) Pulido de la superficie del puntal para el pegado de las galgas (b) Superficie del puntal una vez pulido



Fig. 3.17 Replanteo de bandas extensométricas (a) Posicionamiento de plantilla para el replanteo (b) Marcado de la superficie del puntal

- ✓ Replanteo de bandas extensométricas y limpieza de la superficie del puntal: con el objetivo de instalar las bandas extensométricas, se realizó el replanteo de las tres bandas extensométricas a una altura de 2.50 m. de la base del puntal, distribuidas cada una a 120° en el perímetro del puntal (véase Fig. 3.17).
- ✓ Pegado de bandas extensométricas: las bandas extensométricas o galgas, se pegaron con un pegante especial para acero (PU-120 suministrado por HBM). Para realizar este proceso fue necesario garantizar el perfecto contacto entre la superficie del puntal y la superficie de la galga, siendo necesario previamente al pegado de la galga, limpiar la superficie del puntal con acetona. La Figura 3.18 muestra el proceso de pegado de las galgas en el puntal.

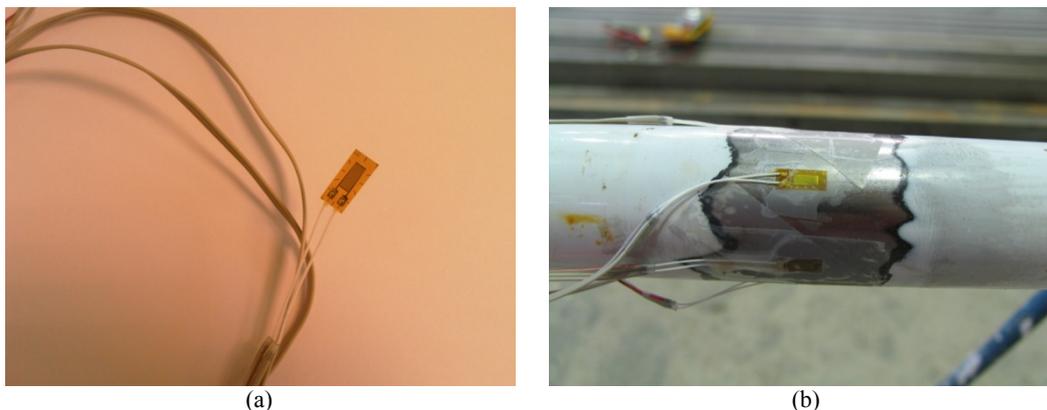


Fig. 3.18 Pegado de bandas extensométricas (a) Banda extensométrica suministrada por HBM (b) Galga pegada en la superficie del puntal

La totalidad de bandas extensométricas empleadas en el estudio experimental, fueron suministradas por HBM, con las siguientes características:

Tabla 3.6 Características de las bandas extensométricas

Tipo	Resistencia	Factor de galga	Sensibilidad transversal	Rango de temperatura
6/120LY41-3-1M	120 $\Omega \pm 0.35\%$	2.05 $\pm 1\%$	-0.1%	-10...+45°C

- ✓ Protección de las bandas extensométricas: con el fin de proteger las bandas extensométricas frente al ataque de la humedad, se empleó un esmalte de poliuretano suministrado por HBM (véase Fig. 3.19(a)). Adicionalmente las galgas se protegieron frente a impactos que puedan sufrir en el manejo de los puntales en obra. Para esto se utilizó una espuma (armaflex), que amortigua este tipo de impactos. Se busco el uso de armaflex ya que también sirve para aislar de la humedad la superficie protegida, dando la posibilidad de proteger las conexiones de las galgas con sus prolongadores, evitando de esta forma que se humedezcan debido a factores como la lluvia (véase Fig. 3.19(b)).
- ✓ Conexión de las bandas extensométricas: para cada uno de los puntales se planteó disponer de un cable apantallado de 9 hilos, consiguiendo mediante conectores macho y hembra, conectar las 3 galgas en un cable prolongador, y así conectarlas con el sistema de adquisición de datos (véase Fig. 3.20).



Fig. 3.19 Protección de bandas extensométricas (a) Aplicación del esmalte de poliuretano (b) Armaflex sometido a presión de agua

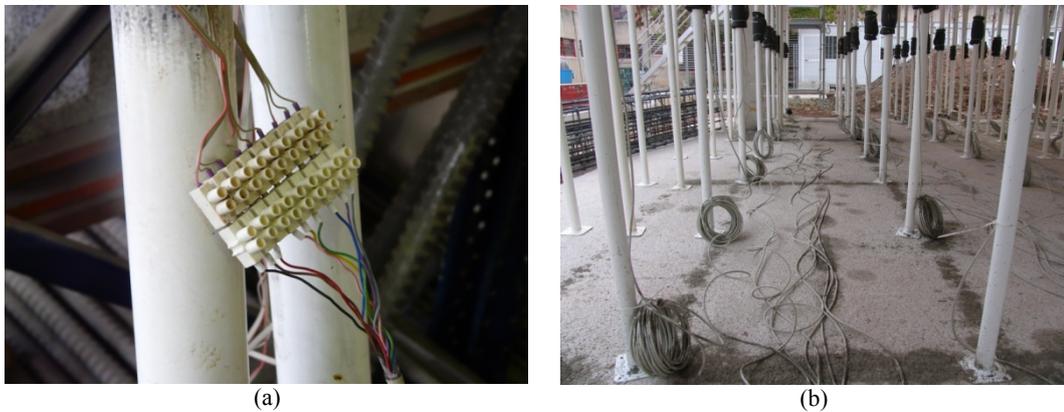


Fig. 3.20 Conexión de bandas extensométricas (a) Conector para tres bandas extensométricas (b) Cables prolongadores de las bandas extensométricas al sistema de adquisición de datos

### 3.6.1.2. Distribución de puntales instrumentados en las fases de construcción

Para la medida de las cargas durante la construcción del edificio experimental, se instrumentaron 80 puntales, siguiendo el proceso descrito en el apartado anterior. La distribución de estos puntales durante cada una de las fases constructivas fue la siguiente:

- ✓ Forjado 1: durante el hormigonado del forjado 1, se encontraban instrumentados 80 puntales correspondientes a la totalidad de puntales bajo el forjado (véase Fig. 3.21 (a)). Un vez clareado el forjado, 32 puntales correspondientes a las sopandas principales estaban instrumentados (véase Fig. 3.21 (b)). Los puntales numerados en la Figura 3.21 se encontraban instrumentados.
- ✓ Forjado 2: los puntales instrumentados retirados del forjado 1, se instalaron en seis sopandas del forjado 2. Los puntales instrumentados se instalaron en cuatro sopandas principales y dos sopandas intermedias (véase Fig. 3.22 (a)). Una vez clareado el forjado todos los puntales estaban instrumentados (véase Fig. 3.22 (b)). Los puntales numerados en la Figura 3.22 se encontraban instrumentados.

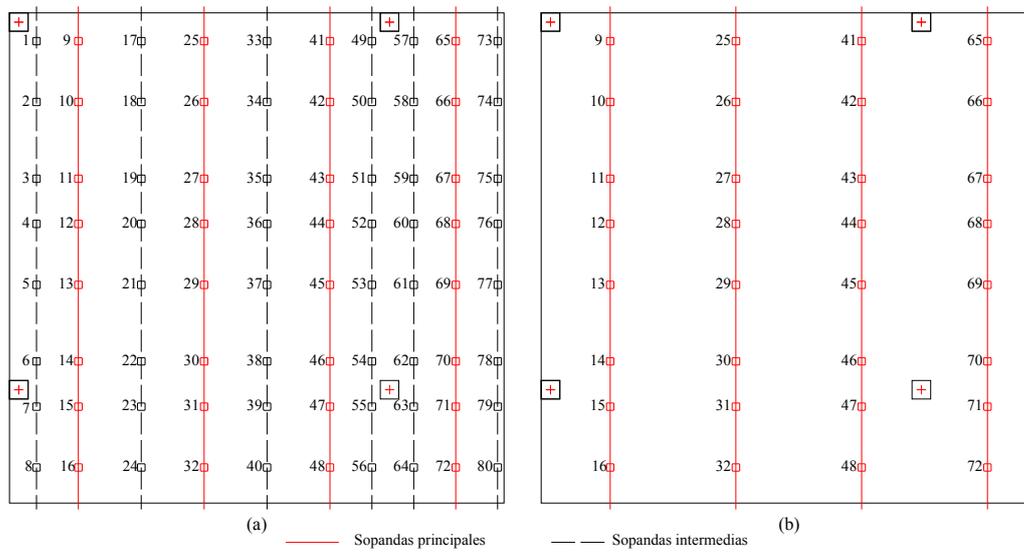


Fig. 3.21 Distribución de puntales instrumentados forjado 1 (a) Hormigonado (b) Clareado

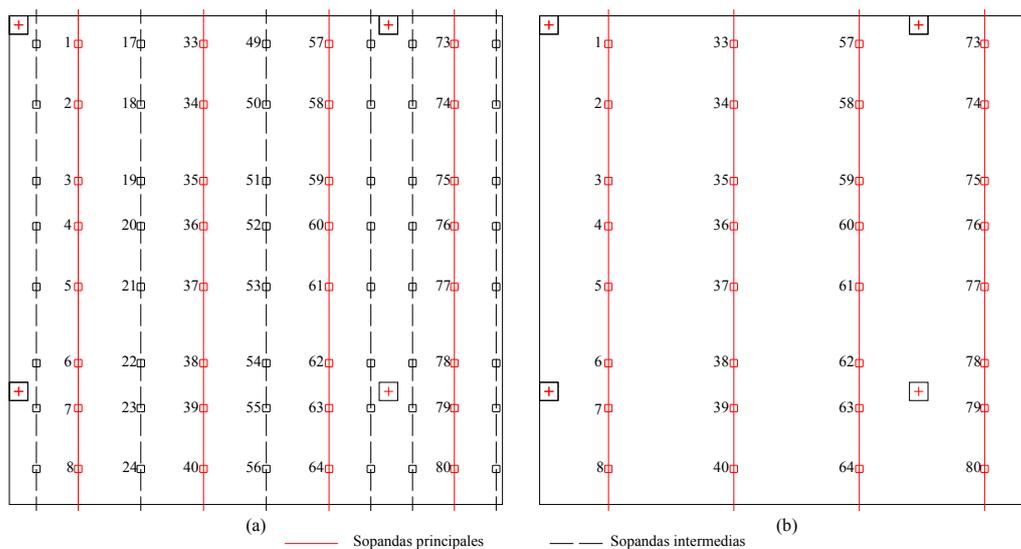


Fig. 3.22 Distribución de puntales instrumentados forjado 2 (a) Hormigonado (b) Clareado

- ✓ Forjado 3: después del clareado del forjado 2 y del descimbrado del forjado 1, se instalaron en el forjado 348 puntales instrumentados correspondientes a 4 sopandas principales y dos intermedias (véase Fig. 3.23 (a)). Un vez clareado el forjado 3 todos los puntales estaban instrumentados (véase Fig. 3.23 (b)). Los puntales numerados en la Figura 3.23 se encontraban instrumentados.

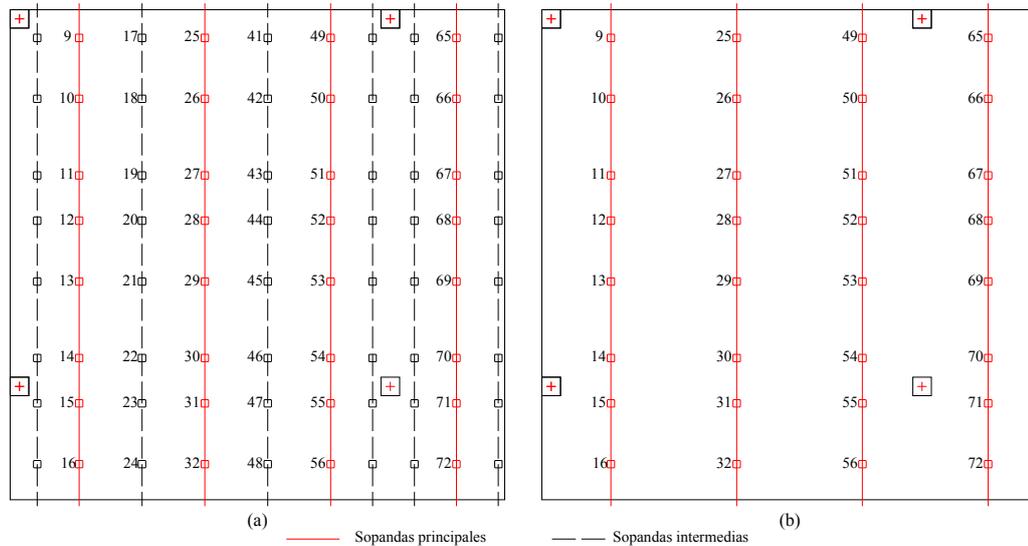


Fig. 3.23 Distribución de puntales instrumentados forjado 3 (a) Hormigonado (b) Clareado

### 3.6.2. Temperatura

Durante la construcción del edificio experimental, se controló la evolución de la temperatura en obra. La evolución de temperaturas se midió en el hormigón de cada uno de los forjados, en probetas cilíndricas normalizadas de hormigón y en puntales. De la misma forma se realizó un registro continuo de la temperatura ambiente en el emplazamiento de la obra.

Para el registro de las temperaturas se instalaron termopares tipo J con un diámetro de 3 mm y 150 mm de largo (véase Fig. 3.24 (a)). Para su conexión se usaron conectores tipo J y cables especiales de prolongación para transmitir los datos al sistema de adquisición de datos.

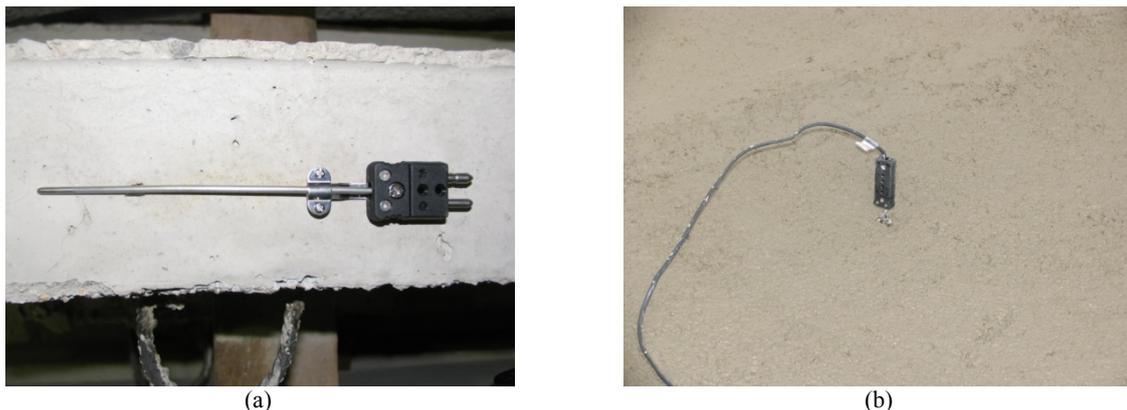


Fig. 3.24 Termopar tipo J (a) Termopar con conector tipo J (b) Termopar embebido en el hormigón

En cada uno de los tres forjados del edificio, se dispusieron 3 termopares embebidos en el hormigón desde el hormigonado del forjado, realizando una medición continua cada 3 minutos. La Figura 3.24 (b) muestra el termopar embebido en el hormigón.

La distribución de los termopares en los forjados se muestra en la Figura 3.25.

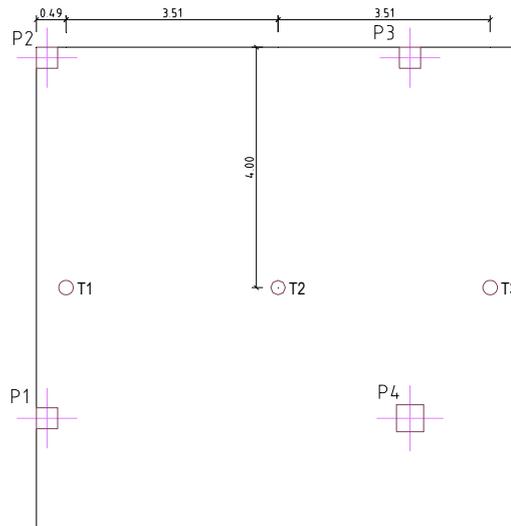


Fig. 3.25 Distribución de termopares en los forjados

### 3.6.3. Deformación de los forjados

Con el fin de conocer las deformaciones provocadas por el proceso constructivo, se instalaron 7 captadores de desplazamiento (LVDTs) dispuestos bajo los forjados 1 y 2. Los captadores se instalaron en pértigas que se ajustan entre los forjados y miden el desplazamiento vertical de estos usando los LVDTs (véase Fig. 3.26).

Los LVDTs empleados en la medición son sensores de desplazamiento en línea del tipo potenciométrico marca Penny & Gilles, con muelle de retorno y 50 mm de rango.

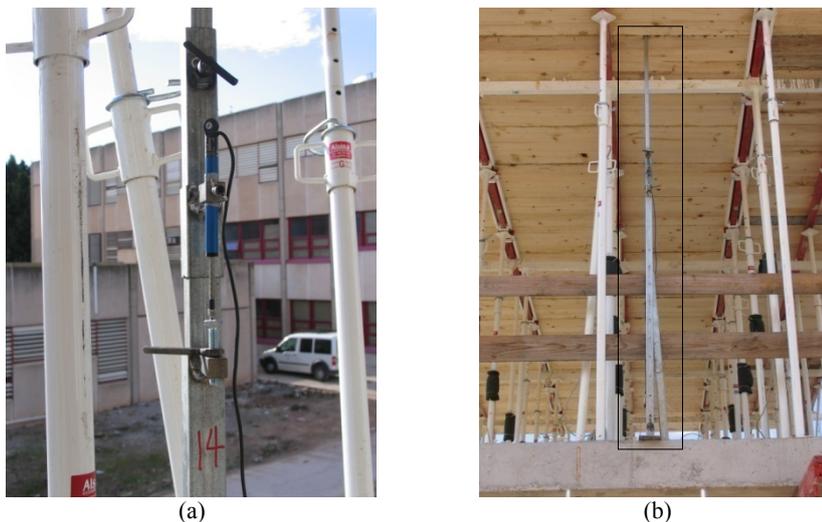


Fig. 3.26 Deformación de los forjados (a) LVDT instalado en la pértiga (b) Pértiga instalada entre los forjados 1 y 2

Para el forjado 1 los datos de deformación se iniciaron a medir una vez clareado el forjado. En el caso del forjado 2 el registro de deformaciones se inicio el día posterior al hormigonado de éste. Su disposición en los forjados es la que se muestra en la Figura 3.27.

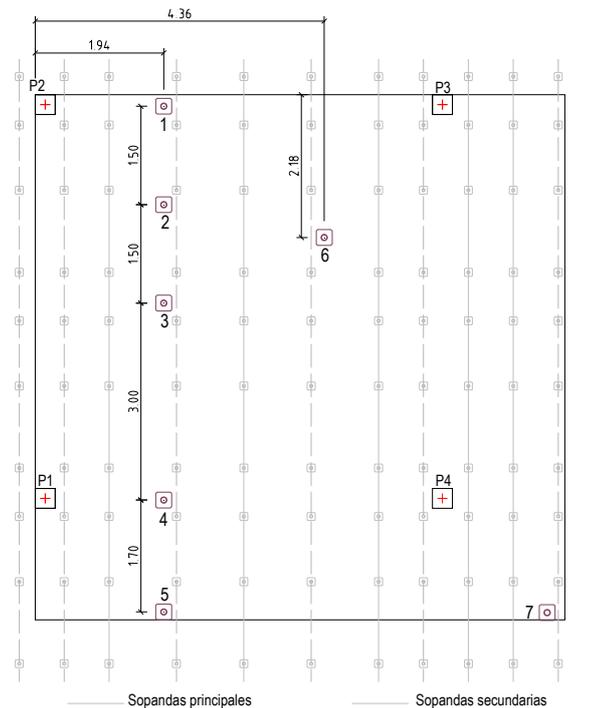


Fig. 3.27 Distribución de los LVDTs en los forjados

### 3.6.4. Sistemas de adquisición de datos

Para la lectura y almacenamiento de los datos recogidos durante la experimentación, se utilizaron distintos módulos de adquisición de datos dependiendo del tipo de medida a leer.

En primera instancia, para la lectura del estiramiento proporcionado por las bandas extensométricas se utilizaron 30 módulos marca NATIONAL INSTRUMENTS, con referencia SG-140, permitiendo recopilar los datos de 240 bandas extensométricas.

En lo referente a los datos suministrados por los captadores de desplazamiento, se utilizaron 3 módulos marca NATIONAL INSTRUMENTS, con referencia AI-110, que permitieron la lectura simultánea de 24 captadores de desplazamiento instalados en la estructura.

Los datos de temperatura fueron recopilados por 3 módulos marcas NATIONAL INSTRUMENTS, con referencia TC-120, permitiendo recopilar las lecturas suministradas por los termopares, con una capacidad de lectura simultánea para 24 de ellos.

Finalmente 4 módulos de red marca NATIONAL INSTRUMENTS, con referencia FP-1601, permitieron transmitir la totalidad de los datos recopilados a un ordenador que almacenaba las lecturas recogidas.

Las Figuras 3.28 (a) y 3.28 (b) muestran los módulos de adquisición de datos descritos anteriormente, y también se aprecia el montaje de los cables prolongadores a cada uno de los instrumentos de medición.

Los datos recopilados por los sistemas de adquisición de datos fueron tratados en el momento de almacenamiento en dos ordenadores Pentium IV, por dos programas desarrollados por D. Vicente Miguel Sosa, miembro de ICITECH.

El primer programa se desarrollo para almacenar ordenadamente los datos recogidos en ficheros donde se almacenó fechas y horas de cada lectura, los valores de estiramiento, deformación y temperatura correspondientes a intervalos de tiempo que el mismo programa permitía modificar.

El segundo programa permitió, en tiempo real, conocer los valores de carga por puntal, temperatura en los volúmenes de hormigón estudiados, la temperatura ambiental y los valores de deformación del forjado. Para esto se utilizaron gráficas que permitieron ver la evolución de estos datos en el tiempo.

Todos los equipos de adquisición y almacenamiento de datos se instalaron en una caseta a pie de obra. Las Figura 3.29 muestra el montaje de los equipos de almacenamiento y adquisición de datos en la caseta.



Fig. 3.28 Módulos de adquisición de datos (a) Módulo de red FP-1601 (b) Trenes de módulos de adquisición de datos con cables prolongadores a los instrumentos de medición



Fig. 3.29 Sistema adquisición y almacenamiento de datos (a) Disposición de los equipos en la caseta (b) Lectura en tiempo real del hormigonado del primer forjado

### 3.7. Plan de ensayos de laboratorio

Se efectuaron ensayos de laboratorio antes y durante la construcción del edificio. Los ensayos previos a la construcción del edificio se centraron básicamente en la evaluación del comportamiento de los puntales frente a cargas de compresión centrada, y a evaluar el correcto funcionamiento de los equipos de adquisición de datos así como del software desarrollado para el almacenamiento y tratamiento de las lecturas de los instrumentos de medida.

Además, durante la construcción del edificio se realizaron ensayos buscando evaluar las diferentes propiedades del hormigón a distintas edades, buscando así, caracterizar el hormigón curado en las mismas condiciones de obra.

#### 3.7.1. Ensayos previos a la ejecución del edificio

Se ensayaron puntales, con el fin de evaluar su comportamiento frente a la aplicación de cargas de compresión centrada, pudiendo así establecer la carga máxima a la que puedan estar sometidos, y compararla con la carga máxima prevista en la construcción del edificio. Además, siendo la base de este estudio experimental las microdeformaciones, se hace necesario calibrar los puntales estableciendo una relación entre las microdeformaciones y la carga transmitida al puntal.

Los ensayos se realizaron en un pórtico metálico, aplicando la compresión centrada a través de una prensa hidráulica con una capacidad máxima de 5000 kN (véase Fig. 3.30). La carga se aplicó hasta la rotura del puntal.

El tratamiento de los datos de la deformación en las bandas extensométricas se efectuó en tiempo real, empleando los equipos de adquisición de datos y el software que posteriormente se empleó en las mediciones durante la construcción del edificio experimental.

Los puntales ensayados se corresponden a la descripción realizada en el apartado 3.5.1 y el proceso de instrumentación es el que se describe en el apartado 3.6.1. Los puntales se ensayaron a una altura de 2.88 m.



Fig. 3.30 Marco metálico y puntal listo para ser ensayado

Se sometieron a ensayo 3 puntales evaluando su comportamiento hasta la rotura, y un puntal más sometido a procesos de carga y descarga para así poder evaluar su posible reutilización durante el desarrollo de la construcción del edificio.

Resumidamente, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

✓ Puntal 1 (23 de Junio de 2006)

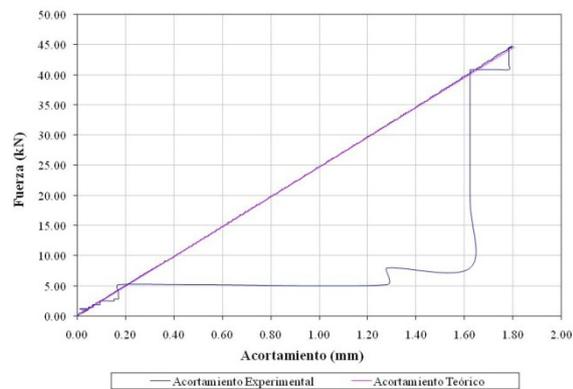
Carga de rotura: 44.71 kN.

La rotura del puntal se produjo por fallo del pasador que apoya la caña del puntal en el cuerpo de éste (véase Fig. 3.31 (a)).

La Figura 3.31 (b) muestra el diagrama fuerza acortamiento del cuerpo del puntal obtenido teórica y experimentalmente.



(a)



(b)

Fig. 3.31 Ensayo puntal 1 (a) Rotura del pasador del puntal (b) Diagrama fuerza acortamiento

✓ Puntal 2 (26 de junio de 2006):

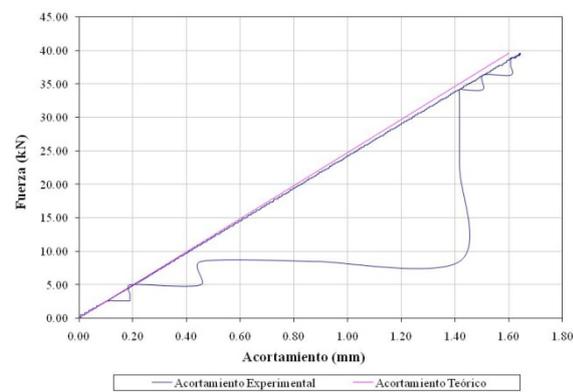
Carga de rotura: 39.57 kN.

La rotura del puntal se produjo por fallo del pasador que apoya la caña del puntal en el cuerpo de este (véase fig. 3.32 (a)).

La Figura 3.32 (b) muestra el diagrama fuerza acortamiento del cuerpo del puntal obtenido teórica y experimentalmente.



(a)



(b)

Fig. 3.32 Ensayo puntal 2 (a) Rotura del pasador del puntal (b) Diagrama fuerza acortamiento

- ✓ Puntal 3 (6 de julio de 2006):

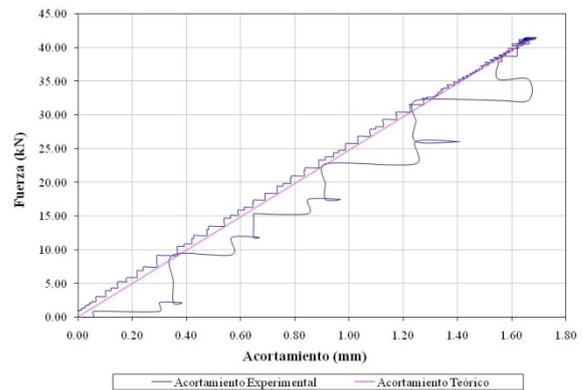
Carga de rotura: 41.46 kN.

La rotura del puntal se produjo por fallo del pasador que apoya la caña del puntal en el cuerpo de este (véase Fig. 3.33 (a)).

La Figura 3.33 (b) muestra el diagrama fuerza acortamiento del cuerpo del puntal obtenido teórica y experimentalmente.



(a)



(b)

Fig. 3.33 Ensayo puntal 3 (a) Rotura del pasador del puntal (b) Diagrama fuerza acortamiento

### 3.7.2. Ensayos durante la construcción del edificio

Además de las medidas de deformación de los puntales, y las medidas de temperatura y deformación de los forjados, se realizaron ensayos de laboratorio al hormigón de cada uno de los forjados con el fin de controlar la evolución de sus propiedades con el tiempo. Los ensayos realizados consistieron en el control de las resistencias a compresión, tracción, flexotracción y del módulo de elasticidad.

El plan de ensayos para los diferentes elementos de la estructura fue el siguiente:

- ✓ Plan de ensayos de laboratorio losa de cimentación:

Tabla 3.7 Plan de ensayos de laboratorio losa de cimentación

Ensayos	Día	Probetas	Total Probetas	Descripción
Compresión simple	1	3	12	24 Probetas cilíndricas de 30 cm.
	3	3		
	7	3		
	28	3		
Tracción indirecta	1	3	12	
	3	3		
	7	3		
	28	3		

- ✓ Plan de ensayos de laboratorio primer forjado:

Tabla 3.8 Plan de ensayos de laboratorio primer forjado

Ensayos	Día	Probetas	Total Probetas	Descripción
Compresión simple	1	3	12	36 Probetas cilíndricas de 30 cm.
	3	3		
	7	3		
	28	3		
Tracción indirecta	1	3	12	
	3	3		
	7	3		
	28	3		
Módulo de elasticidad	1	3	12	
	3	3		
	7	3		
	28	3		
Flexotracción	1	3	12	12 Probetas prismáticas de 10x10 cm. y >35 cm. de largo
	3	3		
	7	3		
	28	3		

✓ Plan de ensayos de laboratorio segundo forjado:

Tabla 3.9 Plan de ensayos de laboratorio segundo forjado

Ensayos	Día	Probetas	Total Probetas	Descripción
Compresión simple	1	3	12	24 Probetas cilíndricas de 30 cm.
	3	3		
	7	3		
	28	3		
Tracción indirecta	1	3	12	
	3	3		
	7	3		
	28	3		

✓ Plan de ensayos de laboratorio tercer forjado:

Tabla 3.10 Plan de ensayos de laboratorio tercer forjado

Ensayos	Día	Probetas	Total Probetas	Descripción
Compresión simple	1	3	12	24 Probetas cilíndricas de 30 cm.
	3	3		
	7	3		
	28	3		
Tracción indirecta	1	3	12	
	3	3		
	7	3		
	28	3		

### **3.8. Conclusiones relativas al planteamiento del modelo experimental**

Establecida la necesidad de conocer como se distribuyen las cargas entre forjados y puntales en un proceso de cimbrado, clareado y descimbrado, el presente capítulo ha descrito el desarrollo del programa experimental objeto de esta investigación.

El programa experimental consistió en construir un edificio de tres plantas con forjados de losa maciza de hormigón armado de 25 cm de canto. Para las características del edificio se han estimado los plazos mínimos para realizar cada una de las operaciones constructivas (hormigonado, clareado y descimbrado).

Para medir las cargas en los puntales se instalaron 3 bandas extensométricas en cada uno de los puntales, dispuestas con un ángulo de 120° y a una altura de 1.25 m de la base del puntal. El valor medio de la deformación de las tres bandas permitió establecer la carga a la que estaría sometido cada uno de los puntales durante la construcción de la estructura.

Se instrumentaron 80 puntales. Durante el cimbrado del primer forjado, la totalidad de puntales bajo el área del forjado se encontraban instrumentados. En el cimbrado de los forjados 2 y 3 se instalaron un total de 48 puntales instrumentados por planta, dispuestos en las sopandas principales y en 2 sopandas secundarias. Durante la fase de clareado, la totalidad de los puntales dispuestos bajo los forjados se encontraban instrumentados.

3 puntales fueron utilizados como referencia, con el objeto de medir el efecto de la temperatura ambiente sobre los puntales, las galgas extensométricas y el equipo de adquisición de datos. Sobre estos puntales no se impuso ningún tipo de coacción en sus extremos, por lo que no formaron parte del sistema de cimbrado del edificio.

Se instalaron 3 termopares embebidos en cada uno de los forjados, para determinar la evolución de la temperatura desde el vertido del hormigón. Asimismo, 2 termopares para medir la temperatura ambiente.

Se instalaron 7 LVDTs entre cada uno de los forjados, con el fin de conocer las deformaciones provocadas por el proceso constructivo.

Para la lectura de las medidas registradas por los elementos de instrumentación, se utilizaron 40 módulos de adquisición de datos.

Los datos recopilados por los sistemas de adquisición eran tratados con la ayuda de 2 ordenadores, equipados con un software desarrollado por personal de ICITECH. En uno de los ordenadores quedaban grabados los datos relativos a: tiempo, deformación en galgas, acortamiento en LVDTs y temperatura en termopares. Con el otro ordenador se visualizaban en pantalla diversos gráficos, en los cuales se reflejaba a tiempo real los valores de carga por puntal, la temperatura en el hormigón, la temperatura ambiente y la deformación en los forjados. Estos equipos se instalaron en un edificio auxiliar, ubicado junto al edificio.

Con el fin de evaluar la precisión y dar por válida la utilización de las bandas extensométricas en los puntales, se ensayaron hasta la rotura 3 puntales sometidos a cargas de compresión centrada.

Se realizaron ensayos sobre el hormigón de cada uno de los forjados, con el fin de evaluar la evolución de la resistencia a compresión, tracción, flexotracción y módulo de elasticidad de probetas curadas en condiciones de obra. Las probetas se fabricaron en el instante del hormigonado de cada uno de los forjados y sus condiciones de curado eran idénticas a las del hormigón de los forjados del edificio.

## **CAPITULO 4. RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL**

### **4.1. Introducción**

Durante la construcción del edificio experimental se realizaron un total 16.905 mediciones correspondientes a medidas tomadas cada 5 segundos durante las fases críticas del ensayo, es decir, durante el clareado y hormigonado de los tres forjados, y medidas tomadas cada 5 minutos durante el resto del ensayo. El total de datos recopilados fueron 4.547.445, que se corresponden con 4.057.200 datos de deformación de galgas en puntales, 355.005 datos de desplazamiento en los captadores de desplazamiento y 152.145 datos de temperatura. De igual forma se recopiló gran cantidad de datos en ensayos previos, y durante la construcción del edificio experimental.

De esta forma, los resultados experimentales se dividen en dos partes generales. En la primera se consideran las medidas instantáneas, es decir, las medidas tomadas una vez ejecutada cada una de las fases del proceso constructivo (hormigonado, clareado, descimbrado). Estas medidas permiten establecer cómo se distribuyen las cargas debidas a las diferentes operaciones del proceso constructivo. El apartado 4.2 de este capítulo muestra los resultados experimentales correspondientes a las medidas instantáneas, analizando la distribución de cargas en el sistema de apuntalamiento y las cargas máximas y medias en puntales.

La segunda parte de resultados consiste en la medición continua, es decir, medidas tomadas en el tiempo transcurrido entre cada una de las fases del proceso constructivo (hormigonado, clareado, descimbrado). Con estas medidas se evalúa cual es la variación de cargas en puntales debido a efectos como las sobrecargas de construcción o la variación de las condiciones climáticas. En el apartado 4.3 se aprecia la variación de cargas en puntales durante el proceso constructivo, evidenciándose la gran influencia que las variaciones de temperatura tienen sobre las cargas en los puntales.

Las medidas experimentales se complementan en los apéndices 3 y 4. El Apéndice 3 recoge las deformaciones en algunos puntos de cada uno de los forjados, donde se estimó podrían producirse los valores de flecha máxima. El Apéndice 4 muestra los resultados de los ensayos del hormigón de cada uno de los forjados.

### **4.2. Cargas instantáneas**

La medición de cargas instantáneas durante la construcción del edificio experimental, permite analizar cómo se transmiten las cargas entre forjados y puntales debido a las operaciones constructivas de hormigonado, clareado y descimbrado de un forjado. Además, también permite conocer cuál es la distribución de cargas transmitidas por el forjado a cada uno de los puntales, y así determinar las

cargas máximas, mínimas y medias en el sistema de apuntalamiento ocasionadas por las operaciones constructivas.

Con el fin de representar la transmisión de cargas durante la construcción de la estructura, los resultados son expresados gráficamente usando la siguiente notación:

- ✓  $W_f$ : peso propio del forjado ( $\text{kN/m}^2$ ). Valor teórico estimado en  $5.64 \text{ kN/m}^2$ .
- ✓  $Q_p$ : carga media en puntales ( $\text{kN/m}^2$ ). Valor obtenido de la medida de cargas en puntales.
- ✓  $Q_f$ : carga media en el forjado ( $W_f - Q_p$ ) ( $\text{kN/m}^2$ ).
- ✓  $C_f$ : coeficiente de carga en forjados que resulta de la relación entre la carga media del forjado y el peso propio del forjado ( $Q_f / W_f$ ).
- ✓  $C_p$ : coeficiente de carga en puntales que resulta de la relación entre la carga media en puntales y el peso propio del forjado ( $Q_p / W_f$ ).
- ✓  $A_t$ : área tributaria del puntal considerado ( $\text{m}^2$ ).
- ✓  $A_{total}$ : área del forjado instrumentada ( $\text{m}^2$ ).
- ✓  $P_i$ : carga instantánea en el puntal "i" (kN).
- ✓  $P_{max}$ : axil del puntal más cargado (kN).
- ✓  $q_{max}$ : axil del puntal más cargado por unidad de superficie ( $P_{max} / A_t$ ) ( $\text{kN/m}^2$ ).
- ✓  $q_{med}$ : carga media en puntales por unidad de superficie que resulta de la relación entre la sumatoria de las cargas en puntales y el área del forjado instrumentada ( $\sum P_i / A_{total}$ ) ( $\text{kN/m}^2$ ).

#### 4.2.1. Hormigonado forjado 1

El hormigonado del forjado 1 se realizó el 28 de Noviembre de 2006. La Figura 4.1 muestra un resumen de las medidas instantáneas.

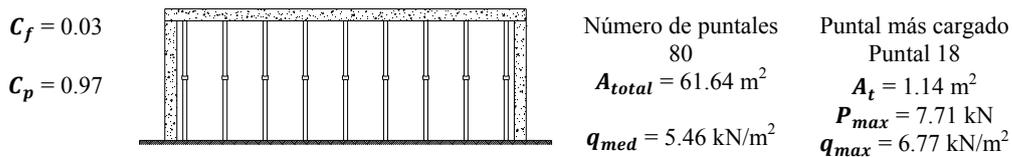


Fig. 4.1 Resultados medición instantánea. Hormigonado del forjado 1

Como era esperable, una vez hormigonado el forjado la carga total fue asumida por el sistema de apuntalamiento.

La distribución de cargas en cada uno de los puntales, de manera intuitiva, al no tener rigidez el forjado recién hormigonado, debería corresponderse al área tributaria que soporta cada puntal. Sin embargo esta afirmación no es del todo cierta debido a lo difícil que resulta asegurar que todos los puntales se encuentren apretados de la misma forma. Así, si un puntal se encuentra excesivamente apretado, los puntales contiguos reciben menos carga y por el contrario si un puntal está escasamente apretado, los puntales que lo rodean recibirán mayor cantidad de carga. La Figura 4.2 muestra la distribución de cargas en puntales utilizando isóneas de carga.

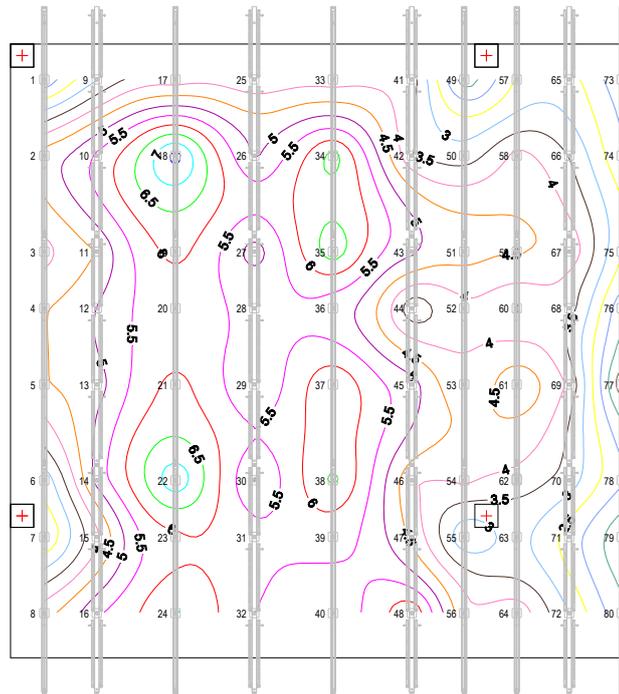


Fig. 4.2 Isolines de carga en puntales bajo el forjado 1. Hormigonado del forjado 1 (kN)

#### 4.2.2. Clareado forjado 1

El clareado del forjado 1 se realizó el 1 de Diciembre de 2006, 3 días después de su hormigonado. En la Figura 4.3 se muestra un resumen de las medidas instantáneas una vez realizado el clareado.

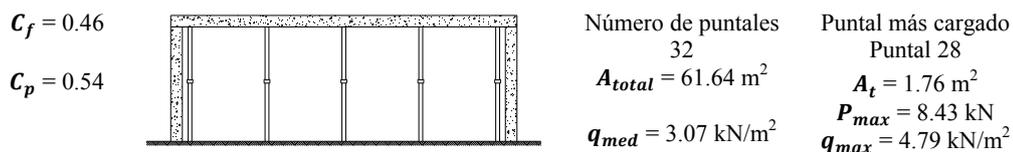


Fig. 4.3 Resultados medición instantánea. Clareado del forjado 1

Al realizar la operación del clareado, el forjado asume un 46% de carga en relación a su peso propio, presentándose una reducción en la carga media de los puntales. Este valor de carga asumido por los puntales confirma que una vez realizado el clareado o descimbrado parcial, el forjado comienza a soportar una fracción importante de su carga.

En general la carga de cada uno de los puntales que se mantienen bajo el forjado al realizar el clareado se incrementa. Sin embargo, esta carga no aumenta en relación a su nueva área tributaria. Por ejemplo, en el puntal 28 la carga antes de realizar el clareado fue de 5.34 kN correspondiente a un área tributaria de  $0.88 \text{ m}^2$ . Después del clareado la carga en dicho puntal fue de 8.43 kN correspondiente a un área tributaria de  $1.76 \text{ m}^2$ , es decir que para dos veces su área tributaria la carga se incrementó 1.58 veces con respecto a su carga en el momento de hormigonado.

La distribución de cargas después de realizar el clareado muestra que el valor de carga máxima en puntales se presenta en la zona de mayor deformación del forjado, al considerarlo apoyado en los pilares de hormigón. Es decir, el forjado comienza a adoptar la deformación que tendrá en su posterior situación de servicio. La Figura 4.4 muestra la distribución de cargas en puntales utilizando isolíneas de carga.

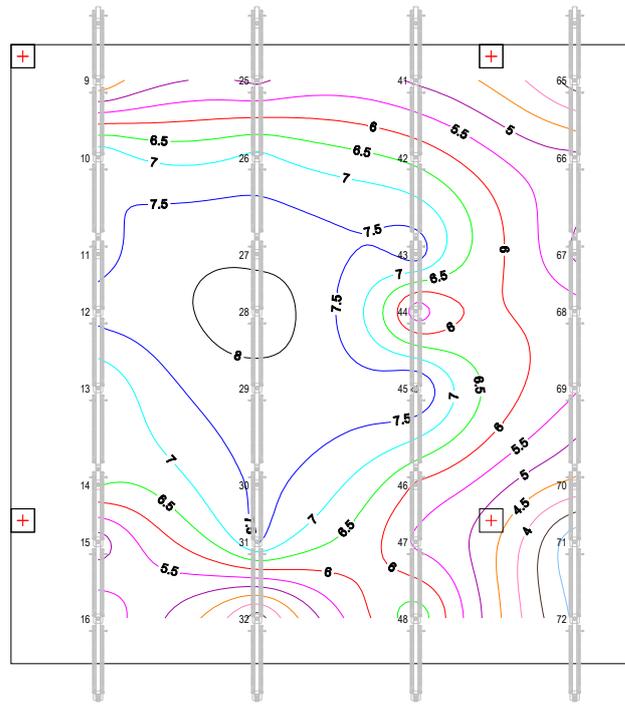


Fig. 4.4 Isolíneas de carga en puntales bajo el forjado 1. Clareado del forjado 1 (kN)

### 4.2.3. Hormigonado forjado 2

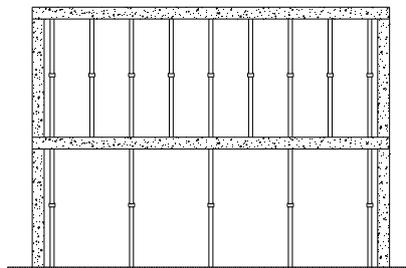
El hormigonado del forjado 2 se llevó a cabo el 5 de Diciembre de 2006, 7 días después del hormigonado de la primera planta. La Figura 4.5 muestra resumidamente las medidas instantáneas obtenidas.

$$C_f = 0.01$$

$$C_p = 0.99$$

$$C_f = 1.20$$

$$C_p = 0.79$$



Número de puntales  
48

$$A_{total} = 42.37 \text{ m}^2$$

$$q_{med} = 5.60 \text{ kN/m}^2$$

Número de puntales  
32

$$A_{total} = 61.64 \text{ m}^2$$

$$q_{med} = 4.48 \text{ kN/m}^2$$

Puntal más cargado

Puntal 18

$$A_t = 1.14 \text{ m}^2$$

$$P_{max} = 8.63 \text{ kN}$$

$$q_{max} = 7.56 \text{ kN/m}^2$$

Puntal más cargado

Puntal 27

$$A_t = 2.02 \text{ m}^2$$

$$P_{max} = 14.57 \text{ kN}$$

$$q_{max} = 7.21 \text{ kN/m}^2$$

Fig. 4.5 Resultados medición instantánea. Hormigonado del forjado 2

De la misma forma que al hormigonar el forjado 1, el sistema de apuntalamiento soporta toda la carga del forjado 2 recién hormigonado.

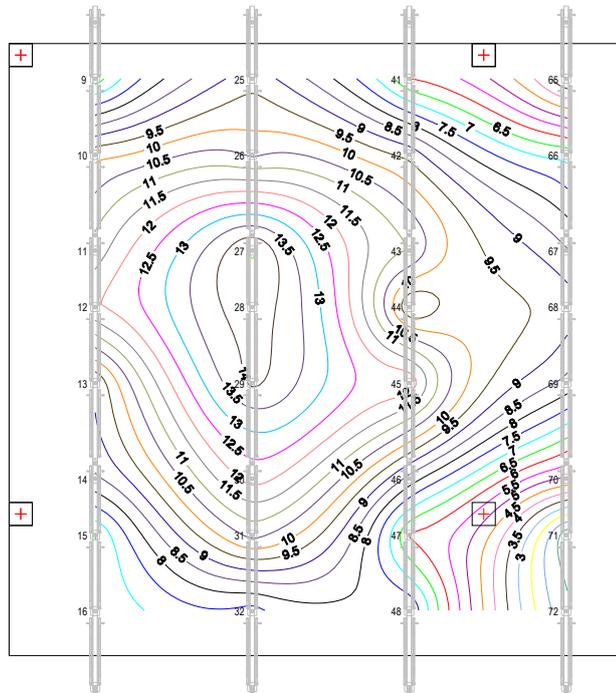


Fig. 4.6 Isolíneas de carga en puntales bajo el forjado 1. Hormigonado del forjado 2 (kN)

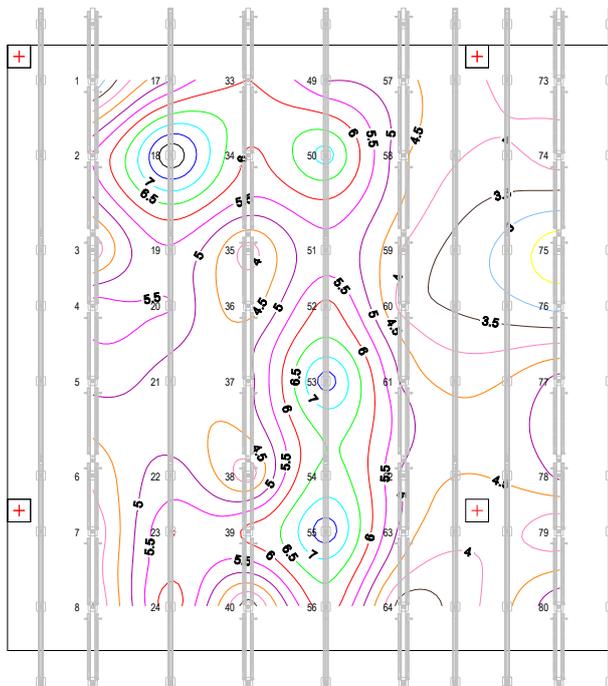


Fig. 4.7 Isolíneas de carga en puntales bajo el forjado 2. Hormigonado del forjado 2 (kN)

La carga transmitida por los puntales que se encuentran bajo el forjado 2 es soportada en gran parte por el forjado 1, sólo transmitiendo un 25% de esta carga a los puntales que se encuentran bajo este forjado. En el caso del puntal 27, que presentó la carga máxima de los puntales bajo el forjado 1, su carga aumento de 7.81 kN a 14.57 kN, es decir, aumento 1.87 veces la carga que tenia después del clareado del primer forjado. Vemos así como, aunque el forjado asume gran parte del incremento de carga (hasta un 75%), el reparto de ésta no es uniforme y las cargas máximas en puntales se incrementan en mayor proporción que la carga media.

Las Figuras 4.6 y 4.7 muestran la distribución de cargas en puntales de los forjados 1 y 2 respectivamente.

#### 4.2.4. Clareado del forjado 2

El clareado del forjado 2 se realizó el 11 de Diciembre de 2006, 6 días después de su hormigonado. La Figura 4.8 muestra un resumen de las medidas instantáneas posterior al clareado del forjado 2.

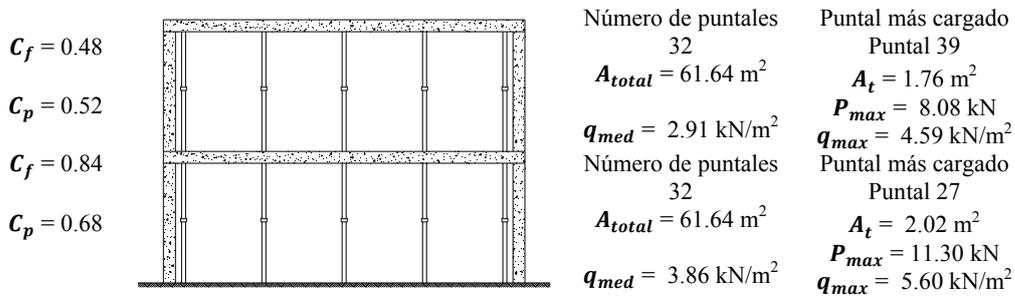


Fig. 4.8 Resultados medición instantánea. Clareado del forjado 2

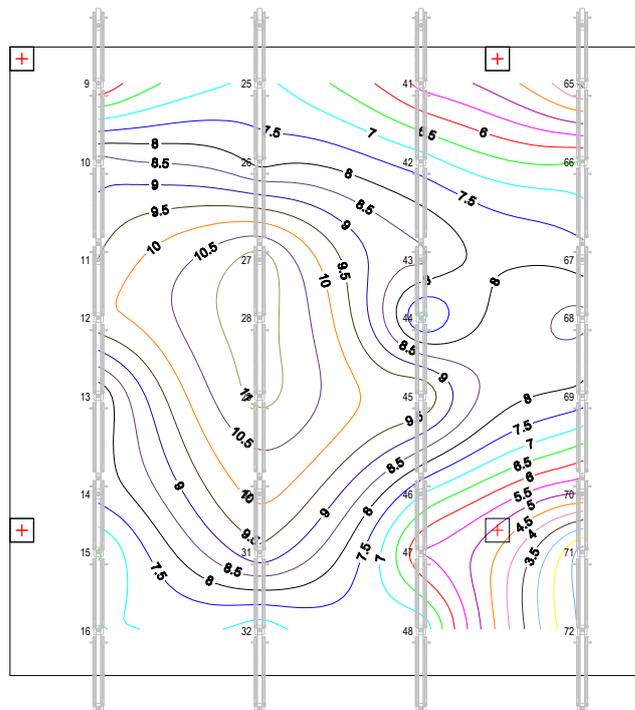


Fig. 4.9 Isocargas de carga en puntales bajo el forjado 1. Clareado del forjado 2 (kN)

Al realizar la operación de clareado en el forjado 2, éste asume el 48% de carga en relación a su peso propio. Valor que resulta similar a la carga asumida en el momento de realizar el clareado por el forjado 1, pese a la diferencia de edades en el momento de realizar el clareado en los dos forjados.

La carga máxima en los puntales bajo el forjado 2 se presentó en el puntal 39. Este puntal incrementó su carga de 6.21 kN para un área tributaria de 0.88 m<sup>2</sup>, a 8.08 kN para un área tributaria de 1.76 m<sup>2</sup>. Es decir, la carga en el puntal 39 se incrementó 1.30 veces para 2 veces su área tributaria al realizar el clareado del segundo forjado.

En el forjado 1 la carga máxima se mantuvo en el puntal 27, con un descenso de 3.57 kN (22%) respecto a la carga que tenía después del hormigonado del forjado 2.

Las Figuras 4.9 y 4.10 muestran la distribución de cargas en puntales una vez clareado el forjado 2.

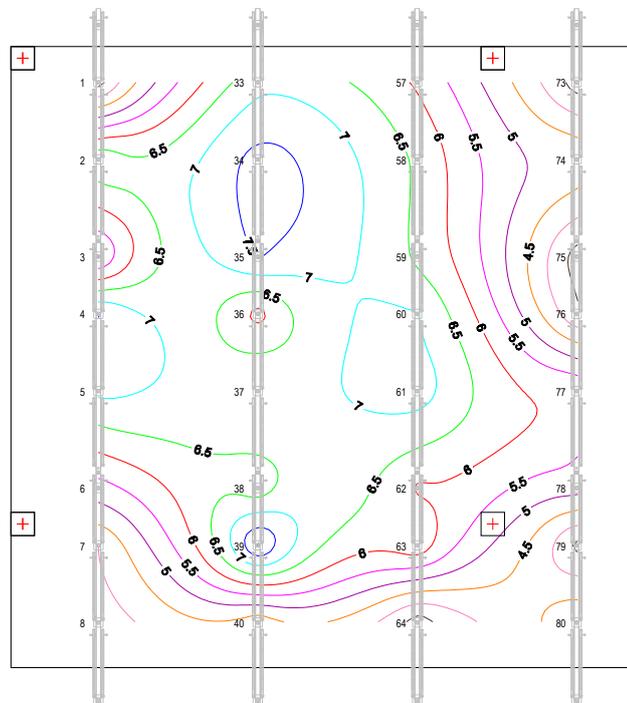


Fig. 4.10 Isolíneas de carga en puntales bajo el forjado 2. Clareado del forjado 2 (kN)

#### 4.2.5. Descimbrado forjado 1

El descimbrado del forjado 1 se realizó el 12 de Diciembre de 2006. Los resultados obtenidos de las medidas instantáneas se muestran en la Figura 4.11.

Una vez descimbrado el forjado 1, la carga asumida por los forjados 1 y 2 aumenta considerablemente. El forjado 2 asume un 72% de carga en relación a su peso propio. El forjado 1 al estar descimbrado soporta la totalidad de su peso propio más el 28% de carga que transmiten los puntales del forjado 2. Estos puntales se descargan y pasan a soportar del 52% de la carga de un forjado al 28% de la carga de dicho forjado.

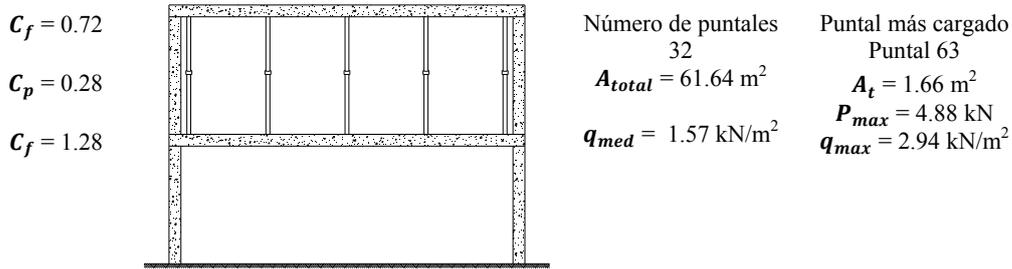


Fig. 4.11 Resultados medición instantánea. Descimbrado del forjado 1

La carga máxima en los puntales bajo el forjado 2 se presenta en el puntal 63. Este puntal al realizar el descimbrado del forjado 1 pasa de soportar 6.38 kN a soportar 4.88 kN, es decir que al descimbrar el forjado 1 se descarga un 24%.

La distribución de cargas del forjado 2 en el sistema de apuntalamiento es la que se muestra en la Figura 4.12.

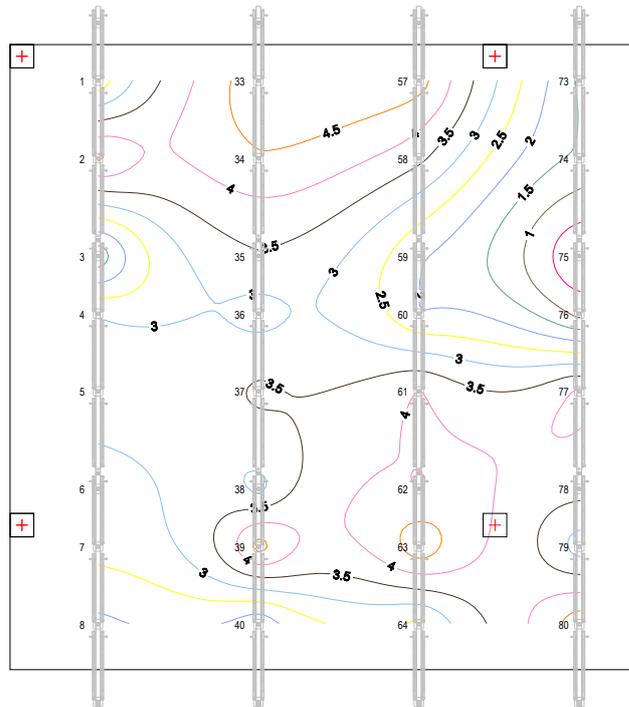


Fig. 4.12 Isolíneas de carga en puntales bajo el forjado 2. Descimbrado forjado 1 (kN)

### 4.2.6. Hormigonado forjado 3

El hormigonado del forjado 3 se hizo el 15 de Diciembre de 2006. La Figura 4.13 muestra un resumen de las cargas instantáneas.

Al igual que en el hormigonado de los forjados 1 y 2, la carga al hormigonar el forjado 3 es soportada en su totalidad por los puntales. Estos puntales transmiten la carga al forjado 2, el cual asume un 72%

de la carga, quedando un 28% de carga para el forjado 1 (reparto similar al presentado al hormigonar el forjado 2).

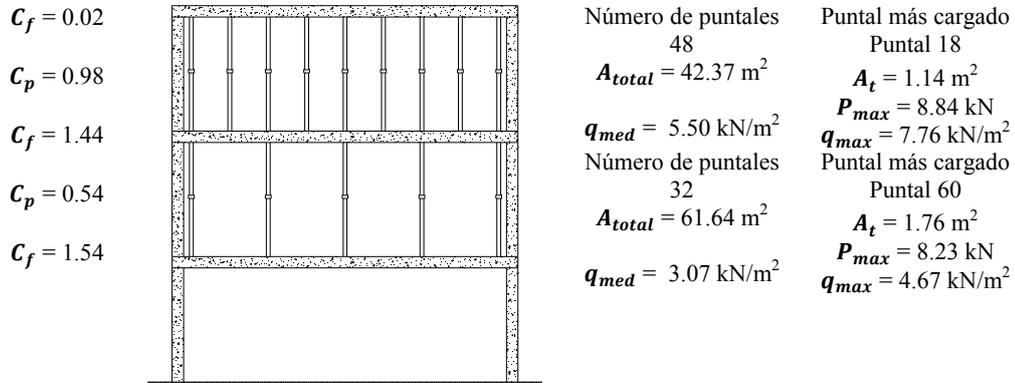


Fig. 4.13 Resultados medición instantánea. Hormigonado del forjado 3

La carga máxima en los puntales bajo el forjado 2 se presentó en el puntal 60. Dicho puntal paso de soportar 2.01 kN a soportar 8.23 kN, es decir, 4.09 veces la carga que tenía al descimbrar el forjado 1.

La distribución de las cargas en los puntales de los forjados 2 y 3 se muestra en las Figuras 4.14 y 4.15 respectivamente.

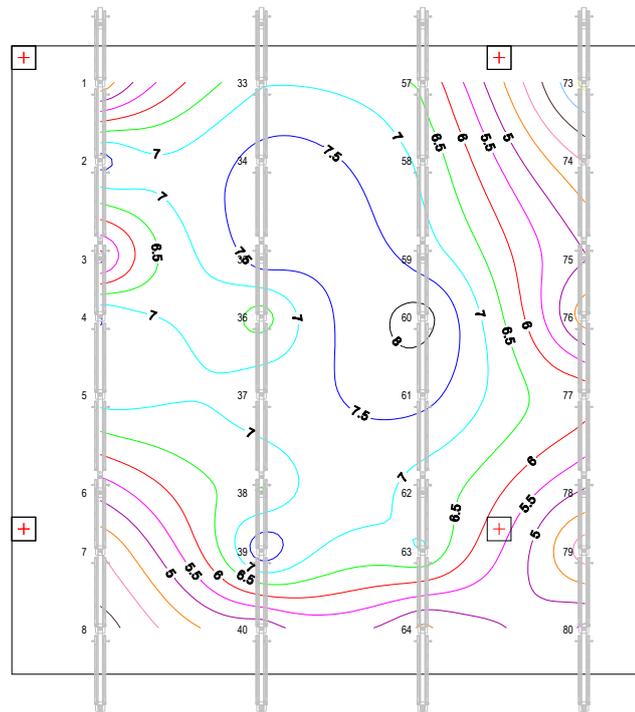


Fig. 4.14 Isótopas de carga en puntales bajo el forjado 2. Hormigonado del forjado 3 (kN)

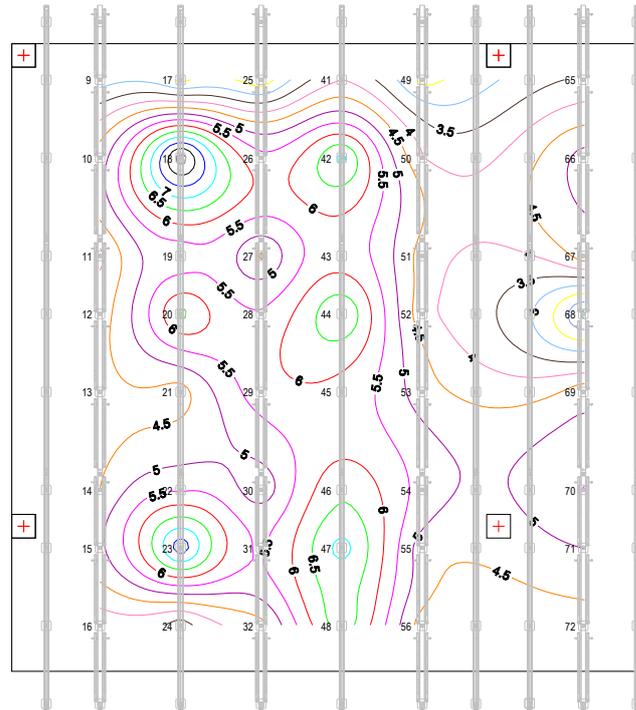


Fig. 4.15 Isolíneas de carga en puntales bajo el forjado 3. Hormigonado del forjado 3 (kN)

### 4.2.7. Clareado forjado 3

Después de 3 días de su hormigonado se llevo a cabo el clareado del forjado 3 (18 de Diciembre de 2006). La medición de cargas instantáneas a modo de resumen se muestra en la Figura 4.16.

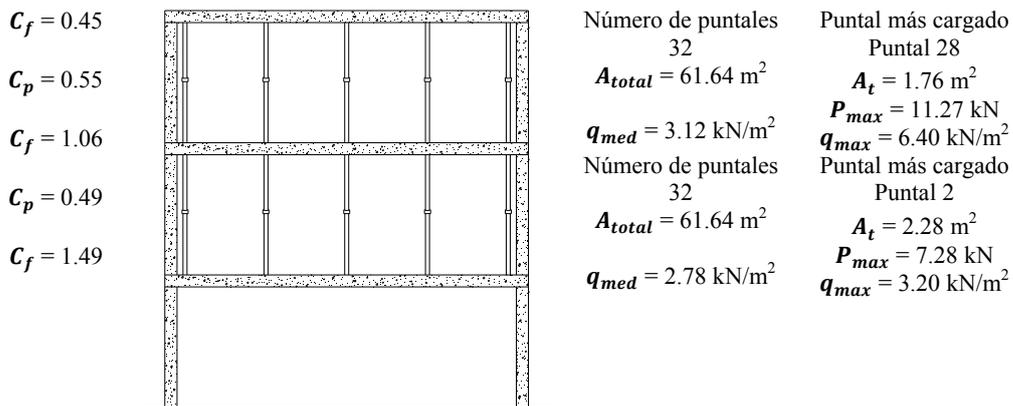


Fig. 4.16 Resultados medición instantánea. Clareado del forjado 3

Al igual que en el clareado de los forjados 1 y 2, al clarear el forjado 3 éste asume una fracción importante de carga correspondiente a un 45% de carga en relación a su peso propio. De esta forma, se presentó una descarga en los puntales bajo el forjado 3, propiciando una descarga de los forjados inferiores conectados con puntales. El forjado 2 pasó de soportar 1.44 a soportar 1.06 veces su peso propio, y el forjado 2 paso de soportar 1.54 a soportar 1.49 veces su peso propio.

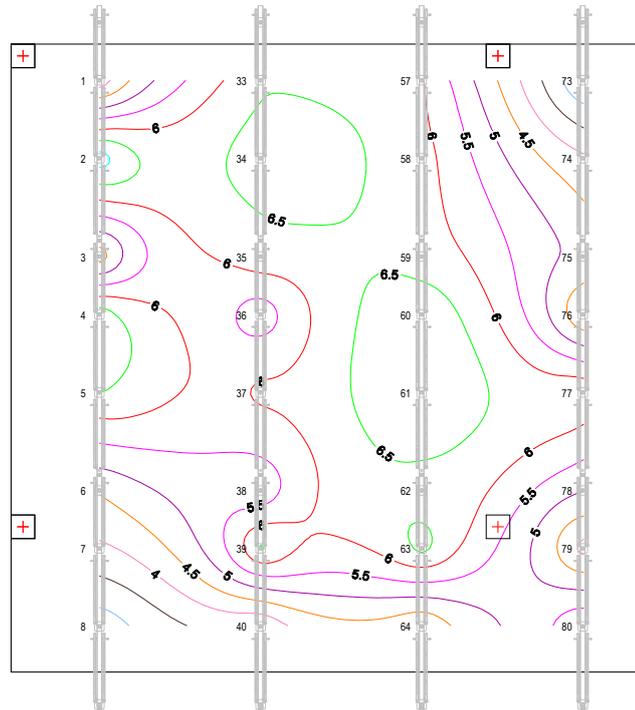


Fig. 4.17 Isolíneas de carga en puntales bajo el forjado 2. Clareado del forjado 3 (kN)

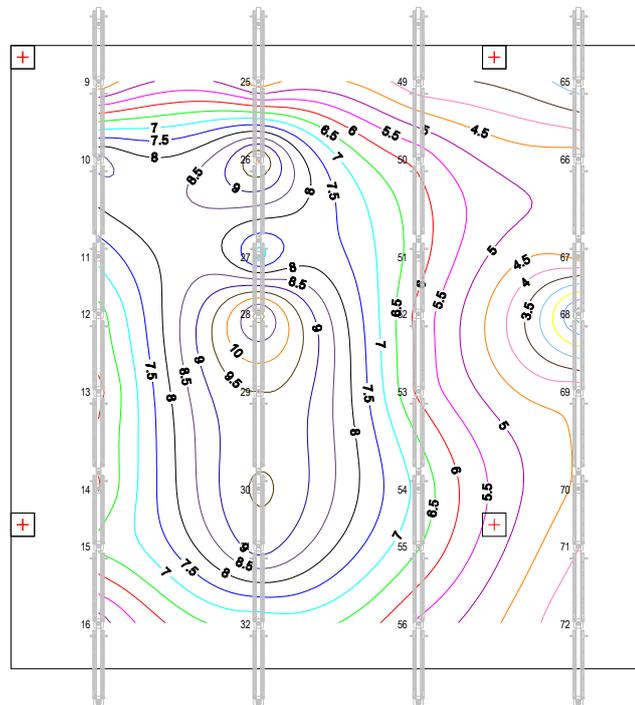


Fig. 4.18 Isolíneas de carga en puntales bajo el forjado 3. Clareado del forjado 3 (kN)

El valor de carga máxima para los puntales bajo el forjado 3 se presentó en el puntal 28. La carga en éste puntal se incrementó de 5.54 kN en el hormigonado del forjado 3, a 11.27 kN en el clareado de éste forjado, es decir que incrementó 2.03 veces su carga inicial. En el caso de los puntales bajo el forjado 2 el valor de carga máxima se presentó en el puntal 2, el cual paso de soportar 7.78 kN a soportar 7.28 kN una vez clareado el forjado 3, es decir descargándose un 7% respecto a la carga que tenía después del hormigonado del forjado 3.

La distribución de cargas en los puntales de los forjados 2 y 3 se muestra en las Figuras 4.17 y 4.18.

#### 4.2.8. Carga en el forjado 3

Con el fin de simular la transmisión de cargas de tres forjados consecutivos cimbrados, en el forjado 3 se aplicó una carga mediante balsas de agua el 22 de Diciembre de 2006. La carga aplicada se correspondió con altura de lámina de agua de 37 cm, correspondiente a una carga de 3.70 kN/m<sup>2</sup>. La Figura 4.19 muestra un resumen de las medidas instantáneas obtenidas. Los coeficientes  $C'_f$  y  $C'_p$  son coeficientes de carga para forjados y puntales obtenidos a partir del incremento de carga que se produce en el forjado 3 debido a la aplicación de la carga de 3.70 kN/m<sup>2</sup>.

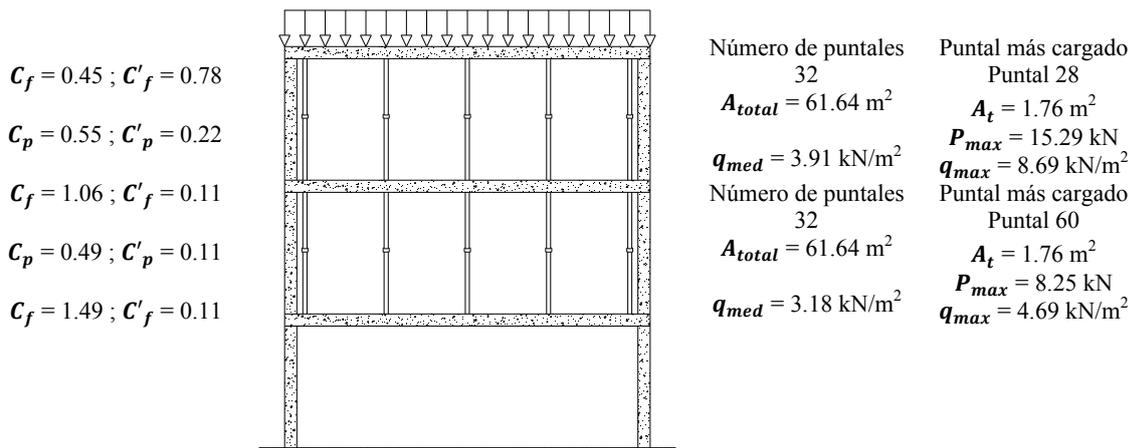


Fig. 4.19 Resultados medición instantánea. Carga en el forjado 3 (Carga de 3.70 kN/m<sup>2</sup>)

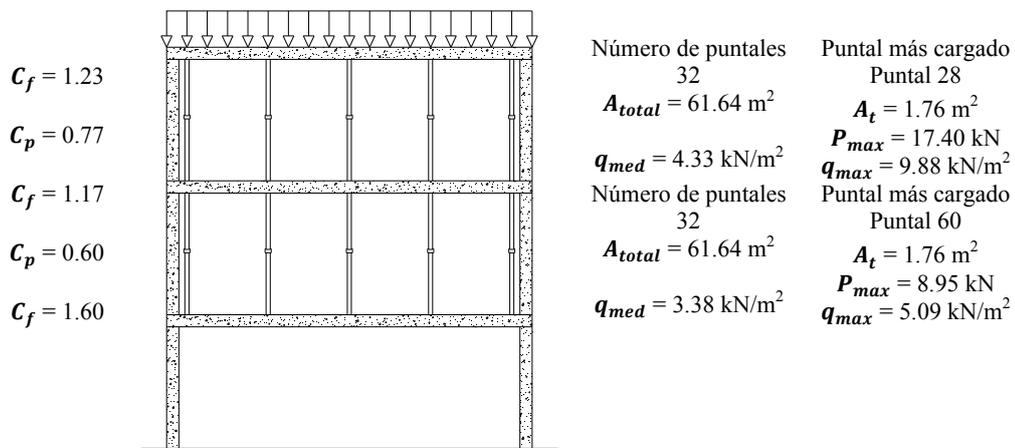


Fig. 4.20 Resultados medición instantánea. Carga en el forjado 3 (Carga de 5.64 kN/m<sup>2</sup>)

Si se considera que el incremento de carga producido al aplicar la carga de  $3.70 \text{ kN/m}^2$  es proporcional para cualquier carga, se obtendría para una carga igual al peso propio de los forjados ( $5.64 \text{ kN/m}^2$ ) los resultados que se muestran en la Figura 4.20.

Al aplicar la carga sobre el forjado 3, éste soporta el 78% de la carga aplicada, dejando el 22% de carga restante a los forjados inferiores, donde se repartió la carga equitativamente.

La carga máxima en los puntales bajo el forjado 3 continuó presentándose en el puntal 28. El puntal paso de soportar  $11.27 \text{ kN}$  a soportar  $15.29 \text{ kN}$  ( $17.40 \text{ kN}$  si consideramos una carga aplicada de  $5.64 \text{ kN/m}^2$  y válida la hipótesis de linealidad), es decir que su carga aumentó en un 54% respecto a la carga que tenía después del clareado del tercer forjado. En los puntales bajo el forjado 2, la carga máxima se presentó en el puntal 60, el cual paso de soportar  $6.91 \text{ kN}$  a soportar  $8.25 \text{ kN}$  ( $8.95 \text{ kN}$  si consideramos una carga aplicada de  $5.64 \text{ kN/m}^2$  y válida la hipótesis de linealidad), es decir un 30% más de carga.

La distribución de cargas en puntales bajo los forjados 2 y 3 es la que se muestra en las Figuras 4.21 y 4.22 respectivamente, considerando que la carga aplicada hubiese sido de  $5.64 \text{ kN/m}^2$ , considerando válida la hipótesis de linealidad.

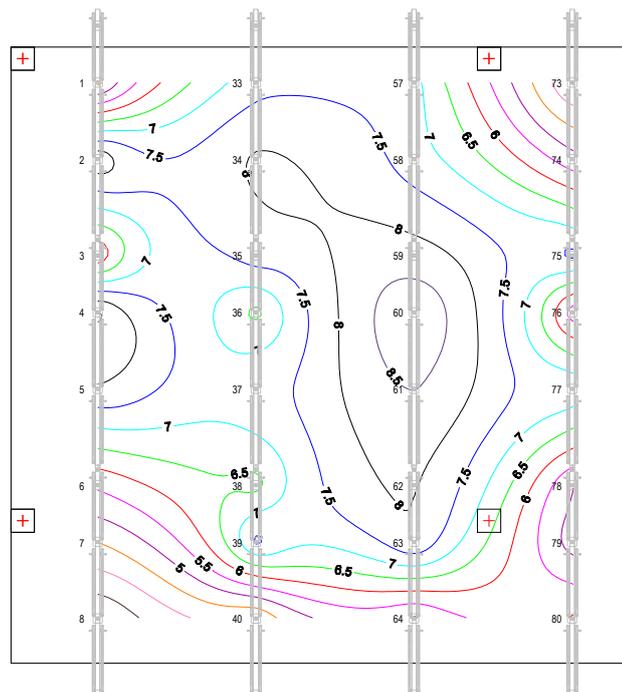


Fig. 4.21 Isolíneas de carga en puntales bajo el forjado 2. Carga en el forjado 3 (kN)

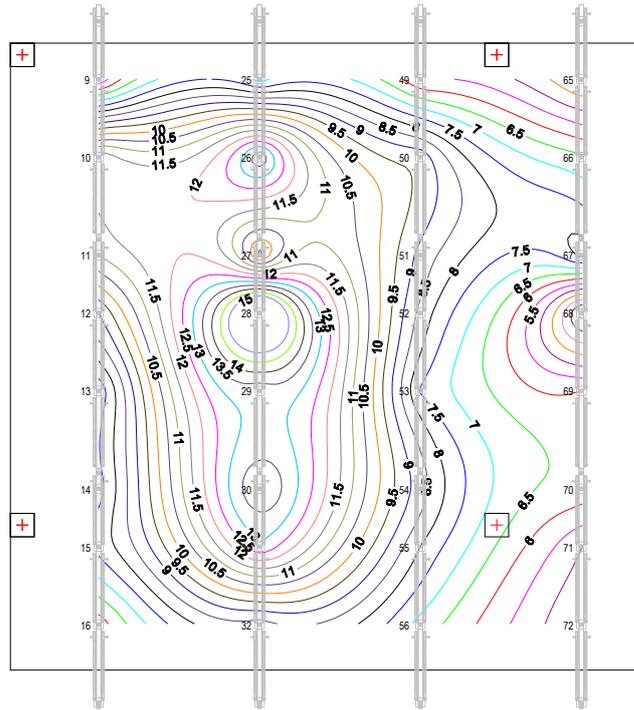


Fig. 4.22 Isolines de carga en puntales bajo el forjado 3. Carga en el forjado 3 (kN)

#### 4.2.9. Descimbrado forjado 2

El descimbrado del forjado 2 se realizó el 23 de Diciembre de 2006. La Figura 4.23 muestra un resumen de las cargas instantáneas una vez descimbrado el forjado 2 (los valores comentados en dicha Figura, y analizados en el presente apartado corresponden a considerar una carga de 5.64 kN/m<sup>2</sup> y válida la hipótesis de linealidad).

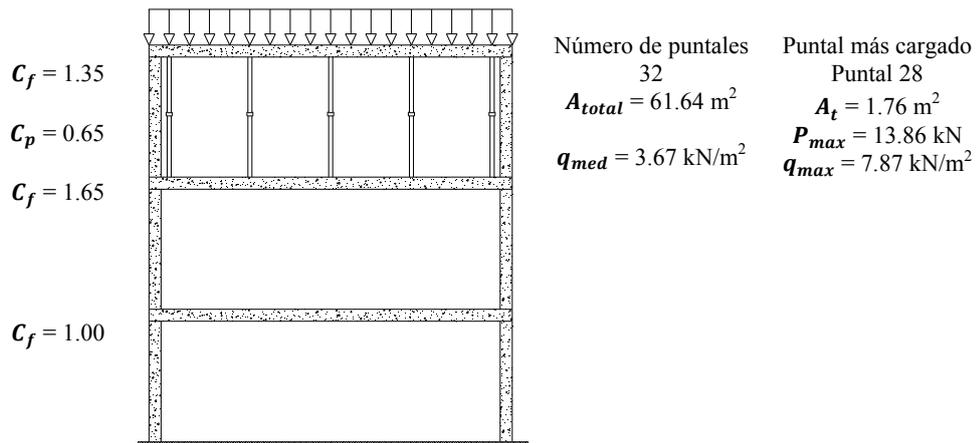


Fig. 4.23 Resultados medición instantánea. Carga en el forjado 3

Una vez descimbrado el forjado 2 la carga que soportaban los puntales retirados fue asumida en un 72% por el forjado 2 y un 28% por el forjado 3.

El puntal 28 siguió presentado el valor de carga máxima de los puntales bajo el forjado 3. Este puntal paso de soportar 17.40 kN al aplicar la carga sobre el forjado 3, a soportar 13.86 kN una vez retirados los puntales bajo el forjado 2, es decir presentado una descarga del 20%.

La Figura 4.24 muestra la distribución de cargas en los puntales del forjado 3 al descimbrar el forjado 2.

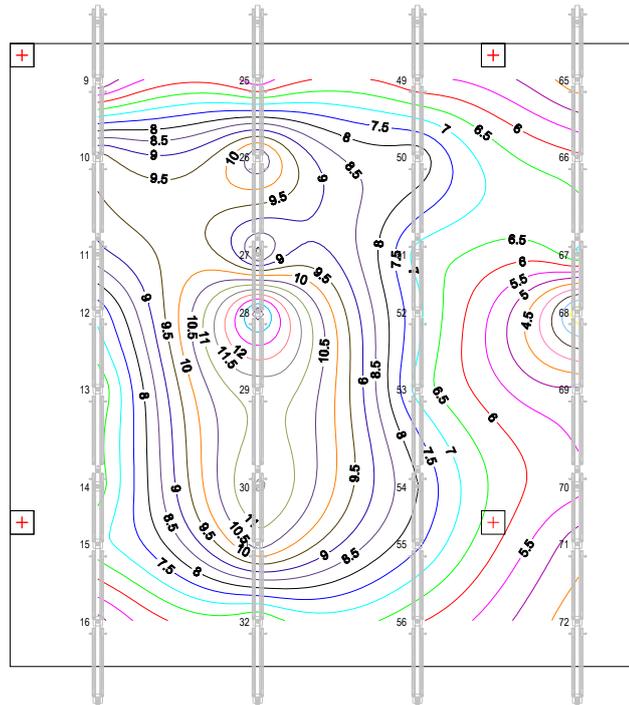


Fig. 4.24 Isolíneas de carga en puntales Forjado 3. Descimbrado forjado 2 (kN)

#### 4.2.10. Resumen medición instantánea

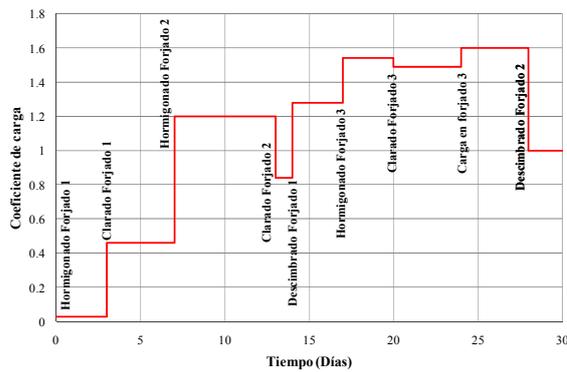


Fig. 4.25 Coeficientes de carga media en el forjado 1

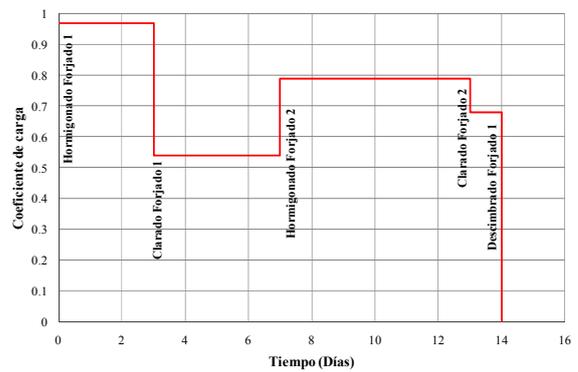


Fig. 4.26 Coeficientes de carga media en puntales bajo el forjado 1

Estudio de la construcción de forjados hormigonados in situ empleando el clareado

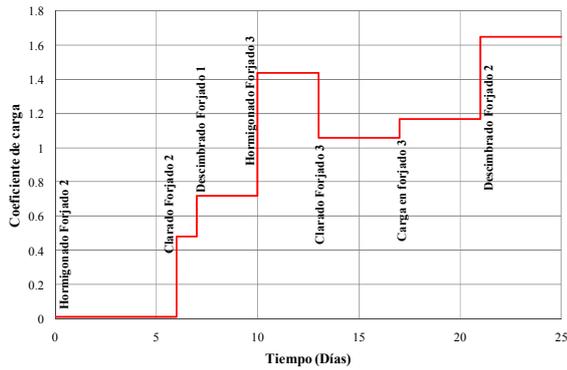


Fig. 4.27 Coeficientes de carga media en el forjado 2

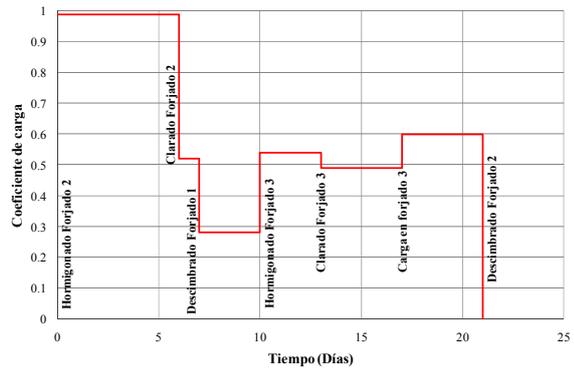


Fig. 4.28 Coeficientes de carga media en puntales bajo el forjado 2

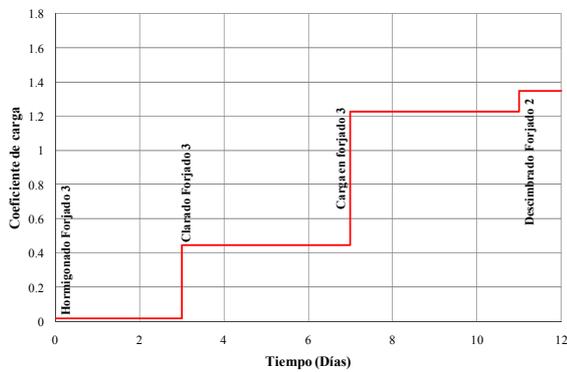


Fig. 4.29 Coeficientes de carga media en el forjado 3

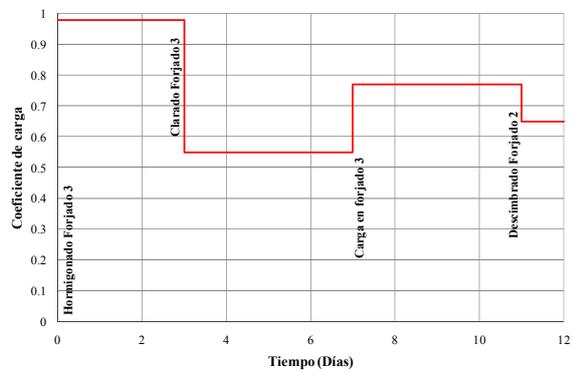


Fig. 4.30 Coeficientes de carga media en puntales bajo el forjado 3

Tabla 4.1 Resumen medición instantánea

Operación	Nivel	$q_{med}$ (kN/m <sup>2</sup> )	Para $q_{med}$		Puntal más cargado	$P_{max}$ (kN)	$q_{max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	Para $q_{max}$	
			$C_p$	$C_f$				$C_{p,max}$	$C_{f,max}$
Hormigonado forjado 1	1	5.46	0.97	0.03	18	7.71	6.77	1.20	0
Clareado forjado 1	1	3.07	0.54	0.46	28	8.43	4.79	0.85	0.15
Hormigonado forjado 2	2	5.60	0.99	0.01	18	8.63	7.56	1.34	0
Clareado forjado 2	2	2.91	0.52	0.48	39	8.08	4.59	0.81	0.19
Descimbrado forjado 2	1	3.86	0.68	0.84	27	11.30	5.60	0.99	0.82
Descimbrado forjado 1	2	1.57	0.28	0.72	63	4.88	2.94	0.52	0.48
	1			1.28					1.52
Hormigonado forjado 3	3	5.50	0.98	0.02	18	8.84	7.76	1.38	0
	2	3.07	0.54	1.44	60	8.23	4.67	0.83	1.55
	1			1.54					1.83
Clareado forjado 3	3	3.12	0.55	0.45	28	11.27	6.40	1.13	0
	2	2.78	0.49	1.06	2	7.28	3.20	0.57	1.56
	1			1.49					1.57
Carga forjado 3	3	4.33	0.77	1.23	28	17.40	9.88	1.75	0.25
	2	3.38	0.60	1.17	60	7.28	5.09	0.90	1.85
	1			1.60					1.90
Descimbrado forjado 2	3	3.67	0.65	1.35	28	13.86	7.87	1.40	0.60
	2			1.65					2.40

A manera de resumen de las mediciones instantáneas, las Figuras 4.25 y 4.26 muestran la evolución del coeficiente de carga, para el forjado 1 y para los puntales bajo éste forjado, durante todo el proceso constructivo. Así mismo, las Figuras 4.27 y 4.28 los coeficientes del forjado 2 y las Figuras 4.29 y 4.30 los coeficientes del forjado 3. Además, la Tabla 4.1 muestra los coeficientes de carga, las cargas medias y las cargas máximas obtenidas en la medición instantánea. En la operación de carga del forjado 3, se considera la aplicación de una carga de  $5.64 \text{ kN/m}^2$ .

### 4.3. Cargas en medición continua

La medición continua consistió en tomar medidas en cada uno de los puntales desde la instalación de éstos antes de hormigonar el forjado, hasta su posterior retirada en la fase de descimbrado. De esta forma, los datos obtenidos en la medición continua recogen las variaciones de carga producidas por las operaciones constructivas y por los efectos como las sobrecargas de construcción o los cambios de temperatura.

Con el fin de expresar los resultados de la transmisión de cargas durante la construcción de la estructura, se han considerado dos periodos para cada fase de construcción, un periodo correspondiente al final de cada operación (hormigonado, clareado, descimbrado), y otro correspondiente al tiempo que transcurre entre el final y antes del inicio de una operación constructiva.

Buscando representar la transmisión de cargas durante la construcción de la estructura, los resultados son expresados gráficamente usando la siguiente notación:

- ✓  $W_f$ : peso propio del forjado ( $\text{kN/m}^2$ ). Valor teórico estimado en  $5.64 \text{ kN/m}^2$ .
- ✓  $Q_p$ : carga media en puntales ( $\text{kN/m}^2$ ). Valor obtenido de la medida de cargas en puntales.
- ✓  $Q_f$ : carga media en el forjado ( $W_f - Q_p$ ) ( $\text{kN/m}^2$ ).
- ✓  $C_f$ : coeficiente de carga en forjados que resulta de la relación entre la carga media del forjado y el peso propio del forjado ( $Q_f / W_f$ ).
- ✓  $C_p$ : coeficiente de carga en puntales que resulta de la relación entre la carga media en puntales y el peso propio del forjado ( $Q_p / W_f$ ).
- ✓  $A_t$ : área tributaria del puntal considerado ( $\text{m}^2$ ).
- ✓  $A_{total}$ : área del forjado instrumentada ( $\text{m}^2$ ).
- ✓  $P_i$ : carga instantánea en el puntal “i” (kN).
- ✓  $P_{max}$ : axil del puntal más cargado (kN).
- ✓  $q_{max}$ : axil del puntal más cargado por unidad de superficie ( $P_{max} / A_t$ ) ( $\text{kN/m}^2$ ).
- ✓  $q_{med}$ : carga media en puntales por unidad de superficie que resulta de la relación entre la sumatoria de las cargas en puntales y el área del forjado instrumentada ( $\sum P_i / A_{total}$ ) ( $\text{kN/m}^2$ ).
- ✓  $P_{max,p+}$ : carga máxima del puntal más cargado en el periodo considerado (kN).
- ✓  $q_{max,p+}$ : carga máxima del puntal más cargado por unidad de superficie ( $\text{kN/m}^2$ ).
- ✓  $\overline{q_{p+}}$ : carga media a lo largo del periodo de tiempo considerado, del puntal más cargado por unidad de superficie ( $\text{kN/m}^2$ ).
- ✓  $q_{min,p+}$ : carga mínima del puntal más cargado por unidad de superficie ( $\text{kN/m}^2$ ).

- ✓  $T$ : temperatura ambiente en el momento de ejecución de la operación constructiva (°C).
- ✓  $\bar{T}$ : temperatura media ambiente entre dos operaciones constructivas consecutivas (°C).

### 4.3.1. Hormigonado del forjado 1

La Figura 4.31 muestra un resumen de las medidas una vez hormigonado el forjado 1. Estas medidas son idénticas a las obtenidas en la medición instantánea porque se corresponden con el inicio de toma de medidas en los puntales de dicho forjado.

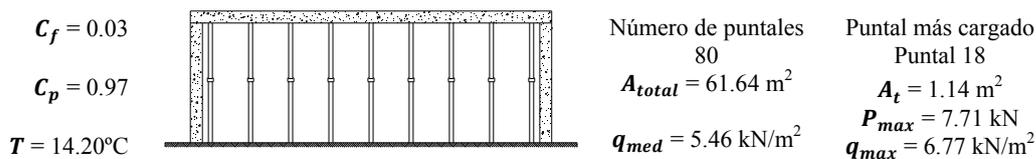


Fig. 4.31 Resultados medición continua. Hormigonado del forjado 1

Posterior al hormigonado la siguiente operación constructiva consistió en el clareado del forjado 1. En el tiempo transcurrido entre el hormigonado y el clareado, se tomaron medidas de cargas y temperatura cada 5 minutos. La Figura 4.32 muestra un resumen de las medidas tomadas entre estas dos operaciones.

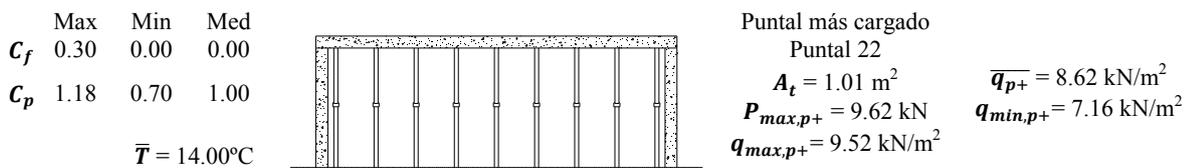


Fig. 4.32 Resultados medición continua. Entre el hormigonado y antes del clareado del forjado 1

Durante el periodo de tiempo entre el hormigonado del forjado 1, e instantes antes del clareado de éste, la carga media por unidad de superficie en puntales presentó variaciones de carga alcanzando un valor máximo de  $6.66 \text{ kN/m}^2$  y un valor mínimo de  $3.95 \text{ kN/m}^2$ .

De una forma general, la carga de todos los puntales instalados bajo el forjado 1 presentó el mismo comportamiento frente a los cambios de temperatura. Este comportamiento consiste en que para un aumento de temperatura se presenta una descarga en puntales, y para un descenso de temperatura un aumento de la carga de los mismos. La carga media por unidad de superficie en los puntales varió entre 0.70 y 1.18 veces el peso propio del forjado para variaciones de temperatura de hasta  $8^\circ\text{C}$ . En la Figura 4.33 (a), se evidencia la importancia que los cambios de temperatura tienen en la evolución del coeficiente de carga en puntales.

El puntal que presentó la carga máxima fue el puntal 22. La carga en dicho puntal una vez hormigonado el forjado fue de  $7.42 \text{ kN}$ . Después del hormigonado y antes del clareado del forjado 1, dicho puntal alcanzó un valor máximo de carga de  $9.62 \text{ kN}$  y un mínimo de  $7.09 \text{ kN}$ . Así, la carga en el puntal 22 varió entre 0.96 y 1.31 veces su carga inicial. La Figura 4.33 (b) muestra la evolución de cargas en los puntales más cargados, donde se evidencia la relación entre la variación de carga con la variación de temperatura.

Adicionalmente la carga en los puntales también debió verse afectada por las diferentes sobrecargas de construcción que actuaron sobre el forjado. Estas sobrecargas consistieron básicamente en el acopio de materiales para la construcción del forjado superior (puntales, encofrado y acero). Sin embargo la aplicación de dichas sobrecargas no evidenció un aumento en la carga de cada uno de los puntales. Lo que lleva a determinar que el efecto de la temperatura es el que condicionó la variación de carga en los puntales (véase Fig. 4.33).

Así, considerando las variaciones de temperatura durante el periodo de tiempo considerado, el forjado 1 llegó a soportar en un instante determinado un 30% de carga en relación a su peso propio, es decir,  $1.69 \text{ kN/m}^2$ .

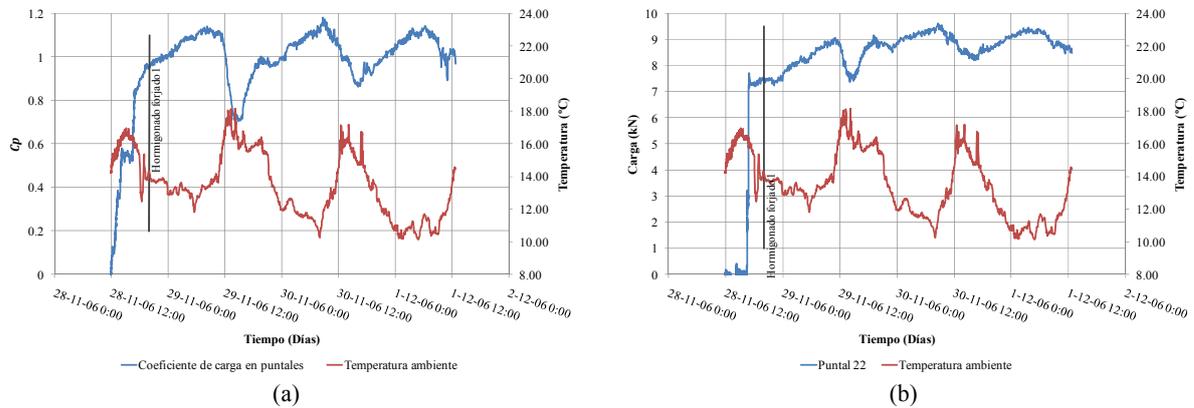


Fig. 4.33 (a) Coeficiente de carga media en puntales entre el hormigonado y antes del clareado del forjado 1. (b) Carga en puntales más cargados entre el hormigonado y antes del clareado del forjado 1

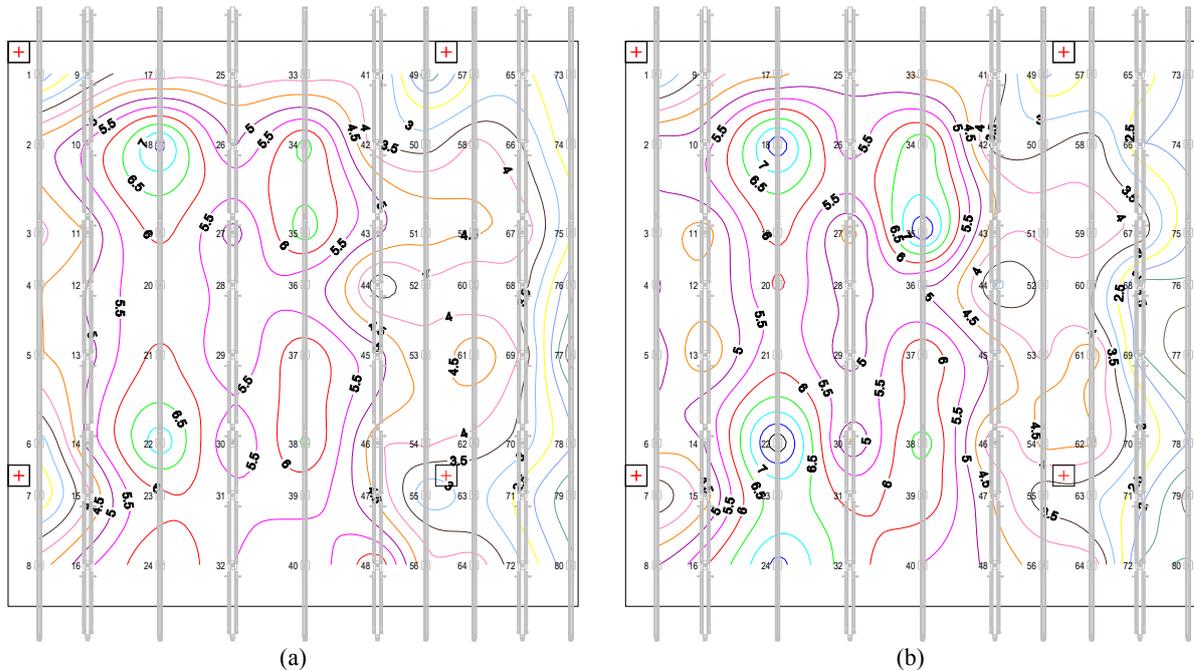


Fig. 4.34 Resultados medición continua isocargas en puntales del forjado 1. (a) Hormigonado del forjado 1. (b) Antes del clareado del forjado 1 (kN)

En la Figura 4.34 se pueden comparar los cambios en la carga de los puntales al final y al inicio del periodo de tiempo entre el hormigonado y antes del clareado del forjado 1. En general la distribución de cargas no cambia excesivamente. Sin embargo la carga de cada uno de los puntales presenta un pequeño incremento con respecto a la carga que tenían después del hormigonado.

### 4.3.2. Clareado del forjado 1

3 días después de su hormigonado se llevo a cabo el careado del forjado 1. La Figura 4.35 muestra un resumen de las medidas tomadas después del clareado.

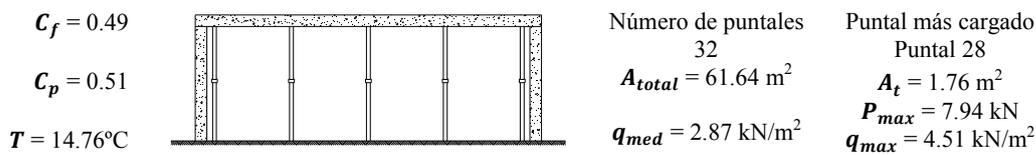


Fig. 4.35 Resultados medición continua. Clareado del forjado 1

Una vez retirados los puntales de las sopandas secundarias el forjado asumió el 49% de carga en relación a su peso propio. Lo que evidencia una importante descarga del conjunto de puntales.

Cuatro días después del clareado del primer forjado se procedió al hormigonado de la segunda planta. La Figura 4.36 muestra un resumen de las medidas tomadas durante el intervalo de tiempo entre el clareado del forjado 1 y el instante anterior al hormigonado del forjado 2.

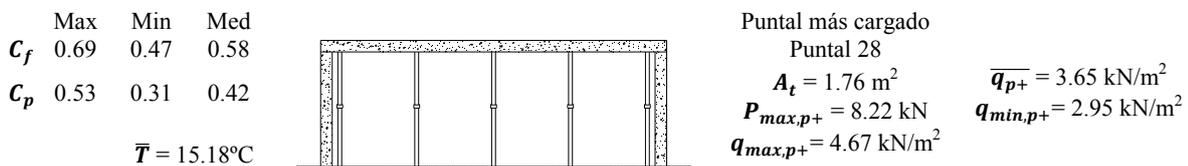


Fig. 4.36 Resultados medición continua. Entre el hormigonado y antes del hormigonado del forjado 2

En el periodo de tiempo considerado, la variación de la carga media por unidad de superficie en puntales alcanzó un máximo de  $2.99 \text{ kN/m}^2$  y un mínimo de  $1.75 \text{ kN/m}^2$ . La Figura 4.37 (a) muestra la variación del coeficiente de carga en puntales después del clareado del forjado 1 e instantes anteriores al hormigonado del segundo forjado. Así mismo, en la Figura 4.37 (b) se observa la variación de carga en el puntal 28, que presentaron la máxima carga del conjunto de puntales.

El comportamiento de la carga en los puntales mantiene la misma pauta de incrementarse cuando baja la temperatura y reducirse cuando aumenta la temperatura. Sin embargo en la Figura 4.37 (a) se observa que el coeficiente de carga media en puntales presenta una menor variación respecto a las variaciones medidas antes de realizar el clareado del forjado para iguales incrementos o descensos de temperatura. Así, la carga media por unidad de superficie de los puntales varió entre 0.31 y 0.53 veces el peso propio del forjado con diferencias de temperatura de hasta  $15^\circ\text{C}$ .

En el instante posterior a la retirada de puntales correspondientes al clareado, una vez ya estabilizada la carga (véase el detalle 1 en la Fig. 4.37 (a)), se presentó un descenso en la carga media por unidad de superficie de los puntales (véase el detalle 2 en la Fig. 4.37 (a)). Este descenso que no se

corresponde con los cambios de temperatura en obra, fue aparentemente motivado por un error de los operarios al retirar los basculantes de las sopandas principales para poder extraer los tableros de encofrado. El valor medido de descarga media por unidad superficie para los puntales fue de  $0.55 \text{ kN/m}^2$ .

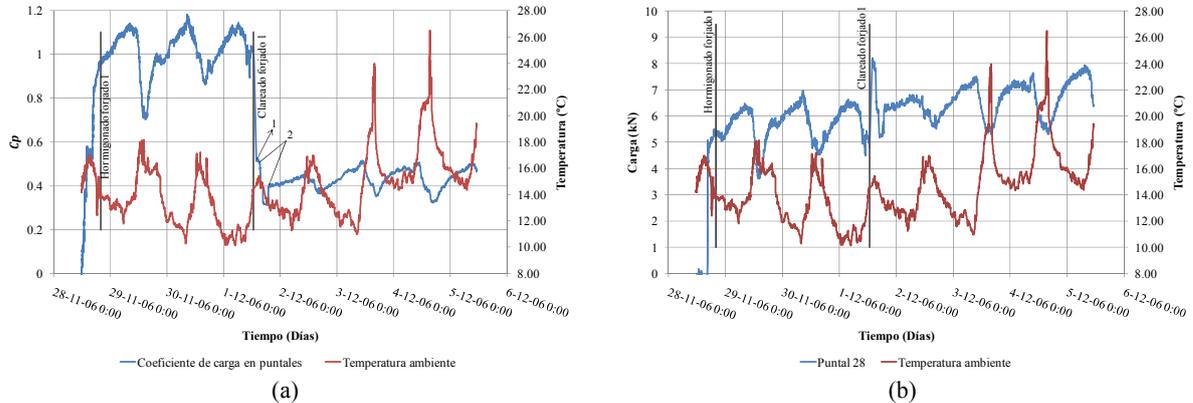


Fig. 4.37 (a) Coeficiente de carga media en puntales del forjado 1 antes del hormigonado del forjado 2. (b) Carga en el puntal 48 antes del hormigonado del forjado 2

La distribución de cargas en los puntales bajo el forjado 1, después de realizar el clareado y antes de hormigonar el forjado 2, es la que se muestra en las Figuras 4.38 (a) y 4.34 (b) respectivamente. En estas Figuras se observa que la distribución de cargas es bastante similar, aunque se evidencia una descarga en algunos de los puntales de la sopanda situada en el centro de vano.

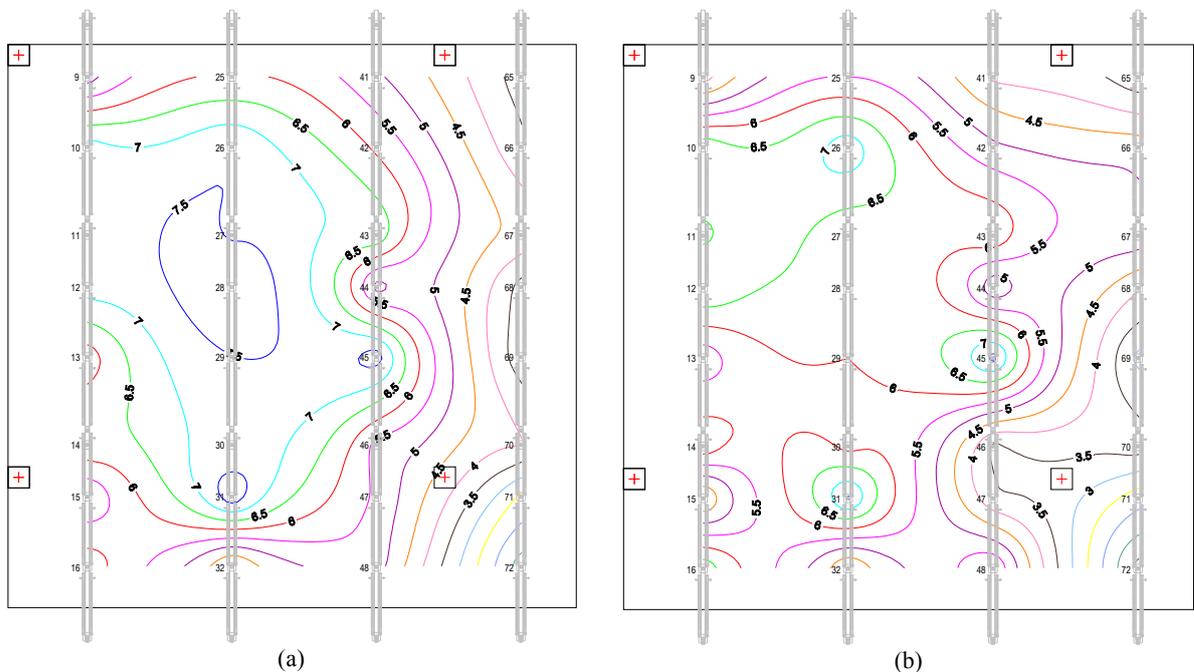


Fig. 4.38 Resultados medición continua isólinas de carga en puntales del forjado 1. (a) Clareado del forjado 1. (b) Antes del hormigonado del forjado 2 (kN)

### 4.3.3. Hormigonado del forjado 2

Después de 4 días del clareado del forjado 1 se hormigón el forjado 2. La Figura 4.39 muestra un resumen de las medidas.

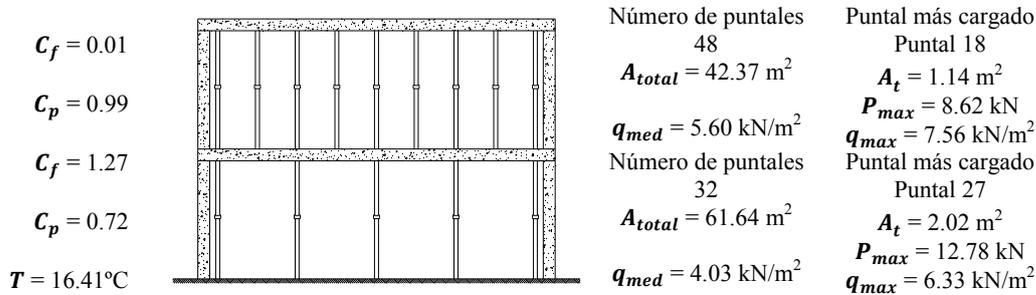


Fig. 4.39 Resultados medición continua. Hormigonado del forjado 2

Las medidas de carga en los puntales bajo el forjado 2 son idénticas a las obtenidas en la medición instantánea ya que es el inicio de toma de medidas para los puntales de dicho forjado. Por ende el forjado 2 en este instante no soporta carga alguna. A diferencia del forjado 1 que se ve sometido a 1.27 veces su peso propio.

Durante los 6 días posteriores al hormigonado del forjado 2, estando éste cimbrado, se tomaron medidas cada 5 minutos. La Figura 4.40 muestra un resumen de las medidas obtenidas entre el hormigonado y antes de clarear el forjado 2.

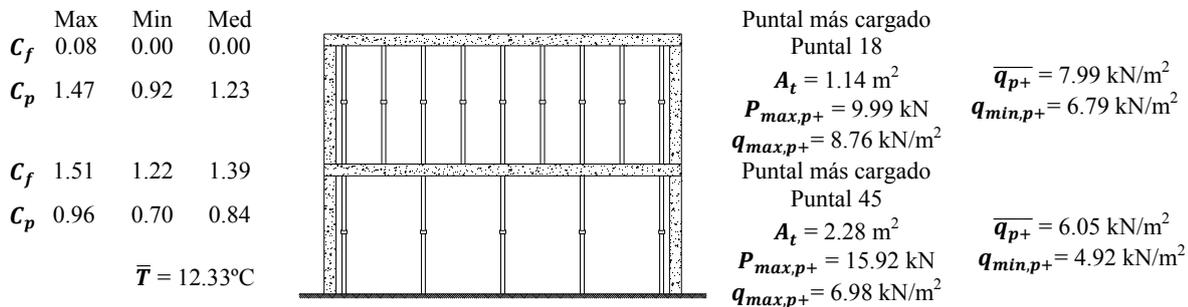


Fig. 4.40 Resultados medición continua. Entre el hormigonado y antes del clareado del forjado 2

La carga media por unidad de superficie de los puntales bajo el forjado 1, entre el hormigonado del forjado 2 y antes del clareado de dicho forjado, presentó variaciones entre 0.70 y 0.96 veces el peso propio del forjado para una diferencia máxima de temperatura de  $14^\circ\text{C}$ . En el caso de los puntales del forjado 2 la variación de carga en los puntales osciló entre 0.92 y 1.47 veces el peso propio del forjado para la misma diferencia de temperatura.

La Figura 4.41 muestra las variaciones del coeficiente de carga media en los puntales del forjado 1 y la Figura 4.42 la variación de carga del puntal 45. La Figura 4.43 (a) muestra las variaciones del coeficiente de carga media en los puntales del forjado 2 y la Figura 4.43 (b) la variación de la carga en el puntal 18.

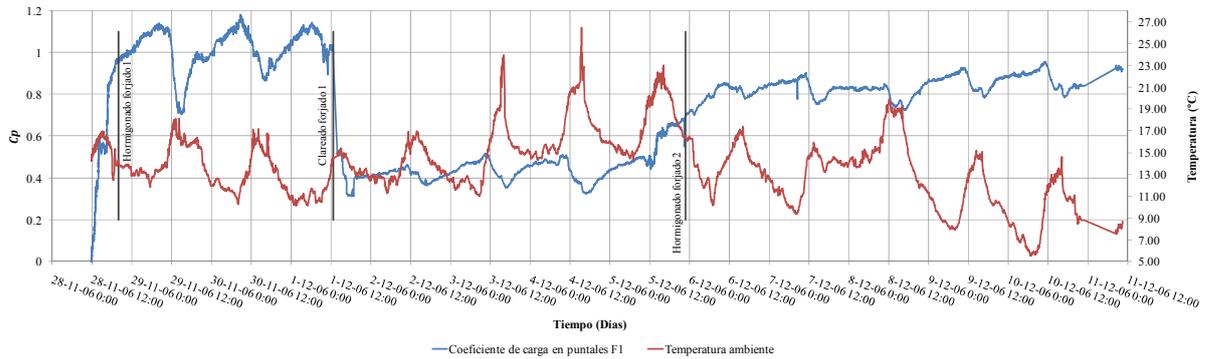


Fig. 4.41 Coeficiente de carga media en puntales del forjado 1 antes del clareado del forjado 2

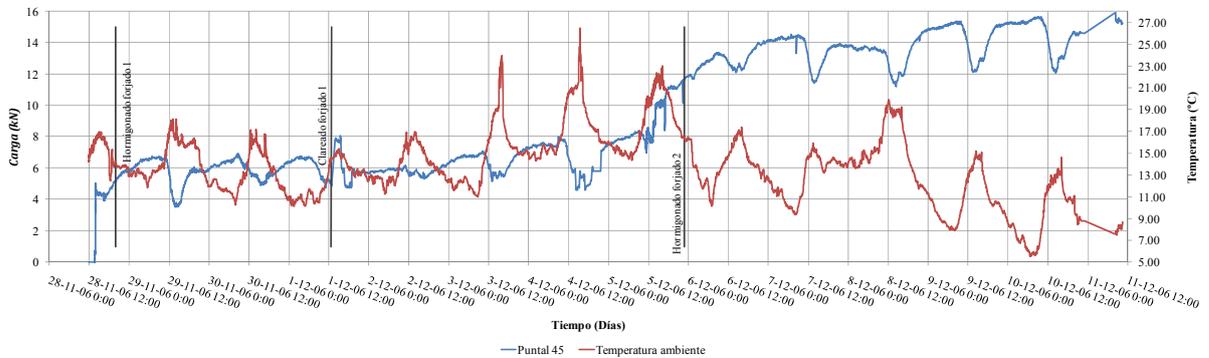


Fig. 4.42 Carga en el puntal 45 antes del Clareado del forjado 2

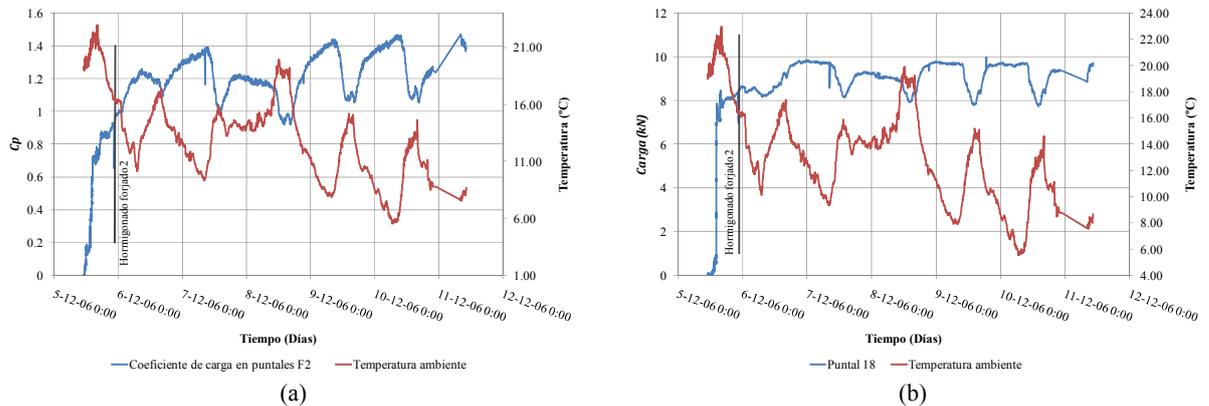


Fig. 4.43 (a) Coeficiente de carga media en puntales del forjado 2 antes del clareado del forjado 2. (b) Carga en el puntal 18 antes del clareado del forjado 2

La Figura 4.44 y 4.45 muestra la distribución de cargas en puntales bajo los forjados 1 y 2 respectivamente en el momento de hormigonado del segundo forjado y antes de clarear éste forjado. En los dos forjados se aprecia que las cargas en los puntales aumentan considerablemente desde el inicio hasta el final del periodo de tiempo considerado. Esto motivado por un importante descenso de temperatura, 6.57°C entre el final del hormigonado del forjado 2 y antes del clareado de éste mismo.

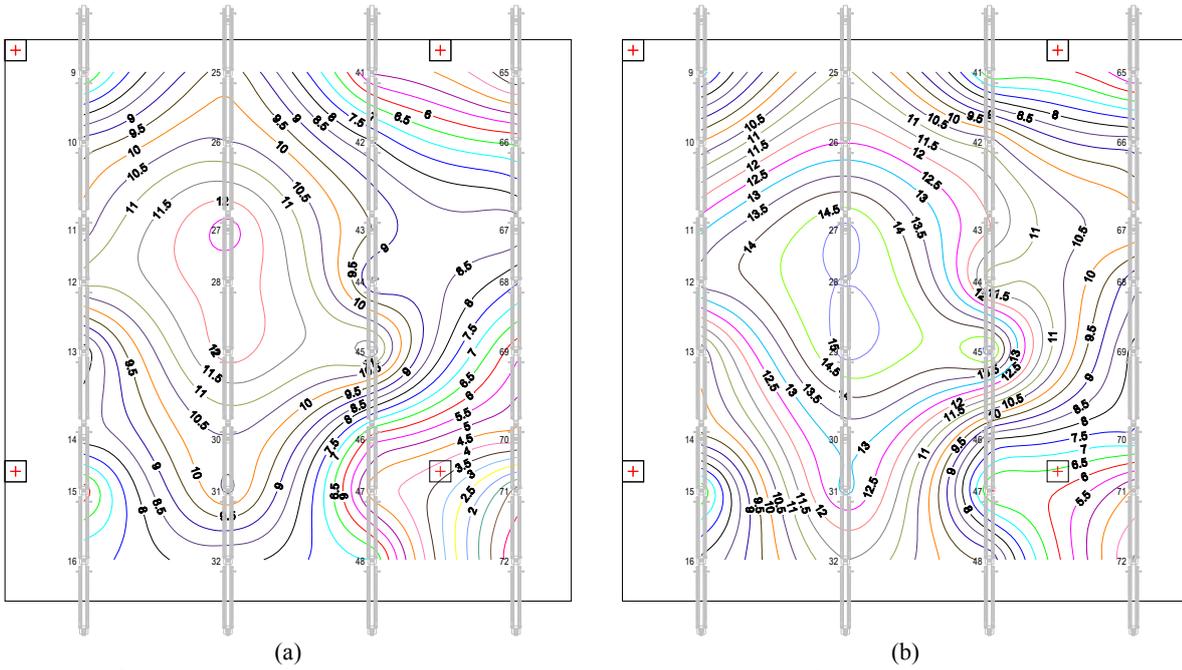


Fig. 4.44 Resultados medición continua isolíneas de carga en puntales del forjado 1. (a) Hormigonado del forjado 2. (b) Antes del clareado del forjado 2 (kN)

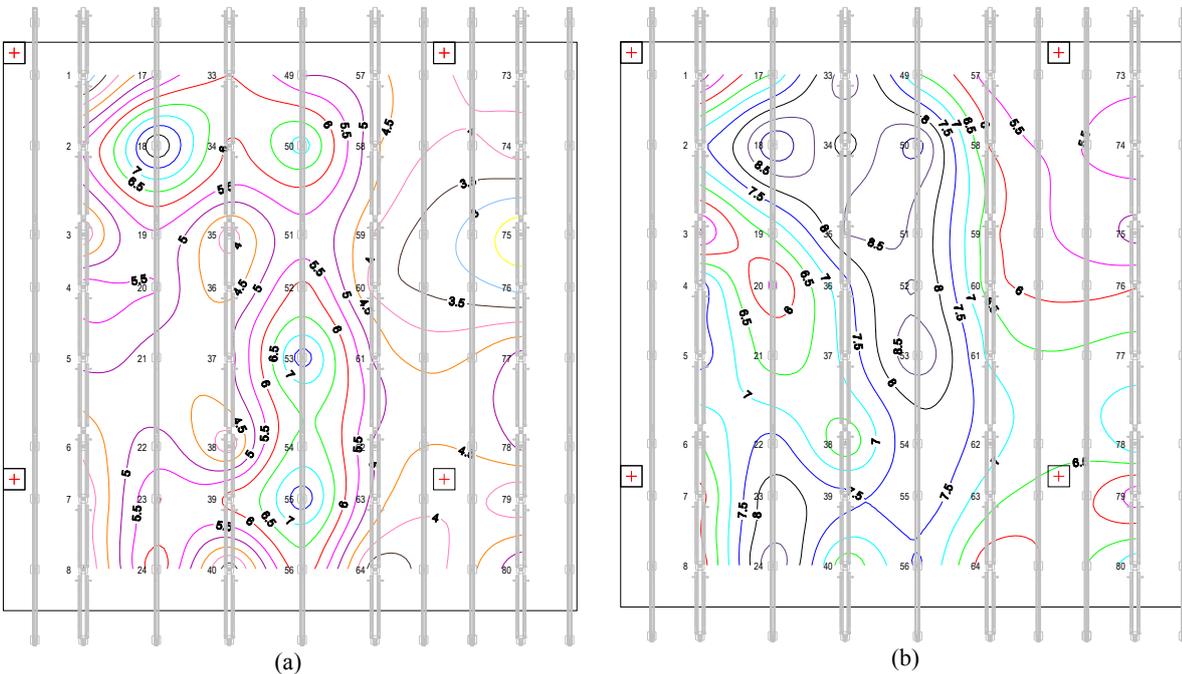


Fig. 4.45 Resultados medición continua isolíneas de carga en puntales del forjado 2. (a) Hormigonado del forjado 2. (b) Antes del clareado del forjado 2 (kN)

#### 4.3.4. Clareado del forjado 2

6 días después del hormigonado del forjado 2, se hizo el clareado de este mismo. La Figura 4.46 muestra un resumen de los resultados obtenidos.

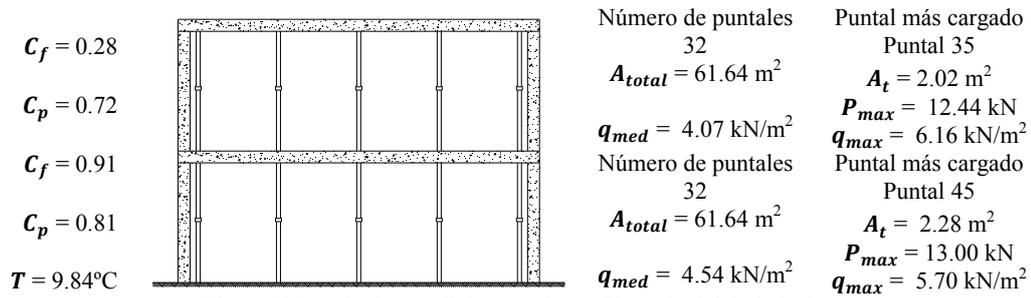


Fig. 4.46 Resultados medición continua. Clareado del forjado 2

Al realizar la operación de clareado en el forjado 2 éste pasa a soportar una fracción importante de su peso propio (28%). De esta forma descargando el conjunto de puntales bajo el forjado 2, que aunque en diferente magnitud es similar a lo sucedido al clarear el forjado 1. La carga máxima en los puntales del forjado 2 se presentó en el puntal 35, llegando a 1.09 veces el peso propio del forjado.

Al dejar de soportar parte de la carga transmitida por los puntales del forjado 2, el forjado 1 experimentó un descenso en la carga que asumía antes del clareado del forjado 2. La carga máxima de los puntales bajo el forjado 1 se presentó en el puntal 45, soportando  $5.70 \text{ kN/m}^2$ .

Después del clareado del segundo forjado al día siguiente se descimbró el primer forjado. La Figura 4.47 muestra un resumen de los resultados para el intervalo de tiempo entre el clareado del forjado 2 y antes de descimbrar el forjado 1.

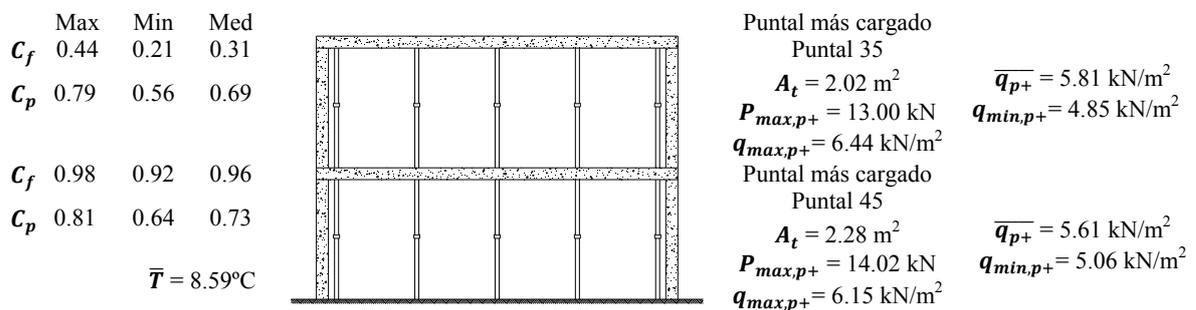


Fig. 4.47 Resultados medición continua. Entre el clareado del forjado 2 y antes del descimbrado del forjado 1

Las variaciones de carga por unidad de superficie en los puntales del forjado 1 oscilaron entre  $3.61 \text{ kN/m}^2$  y  $4.57 \text{ kN/m}^2$ , y para el forjado 2 entre  $3.16 \text{ kN/m}^2$  y  $4.46 \text{ kN/m}^2$ . Estas variaciones se corresponden a la oscilación de la temperatura ambiente, que llegó a un máximo de  $12.96^\circ\text{C}$  y un mínimo de  $5.27^\circ\text{C}$ . El comportamiento de las cargas en los puntales con respecto a la temperatura es igual que en los periodos de tiempo descritos en los apartados anteriores, es decir, la carga en los puntales aumenta cuando disminuye la temperatura, y la carga desciende cuando se incrementa la temperatura.

La Figura 4.48 muestra la variación del coeficiente de cargas en puntales para el forjado 1 y la Figura 4.49 la variación de carga del puntal 45 (puntal que presentó la carga máxima en los puntales bajo el forjado 1). La variación del coeficiente de carga para los puntales del forjado 2 es la que se muestra en la Figura 4.50 (a). La Figura 4.50 (b) muestra la variación de carga en el puntal 35, que presentó la carga máxima en el intervalo de tiempo considerado.

Estudio de la construcción de forjados hormigonados in situ empleando el clareado

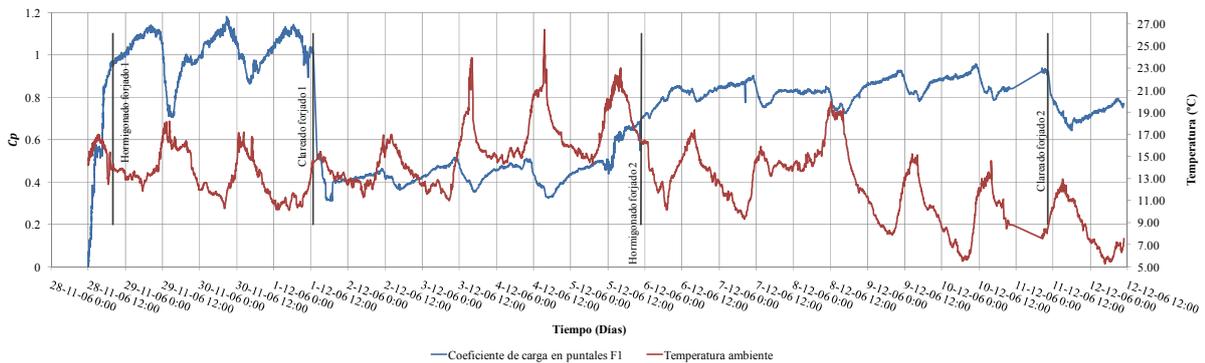


Fig. 4.48 Coeficiente de carga media en puntales del forjado 1 antes del descimbrado del forjado 1

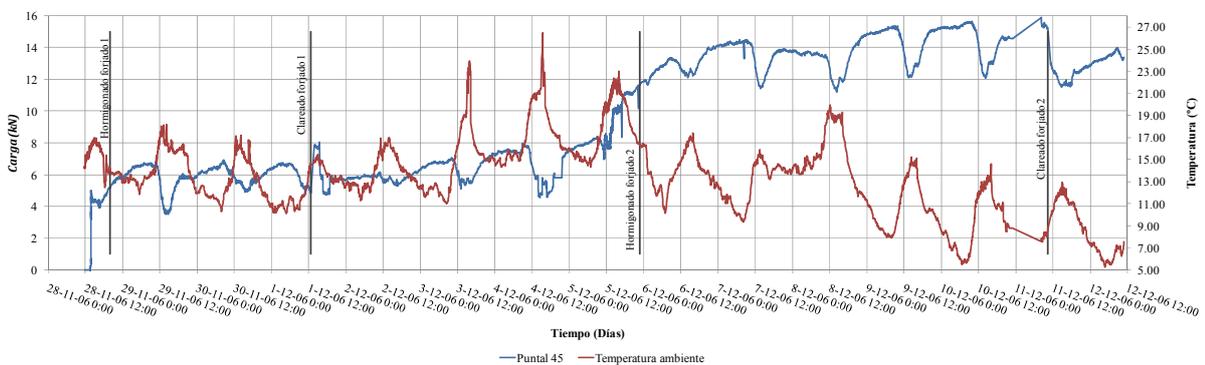


Fig. 4.49 Carga en el puntal 45 antes del descimbrado del forjado 1

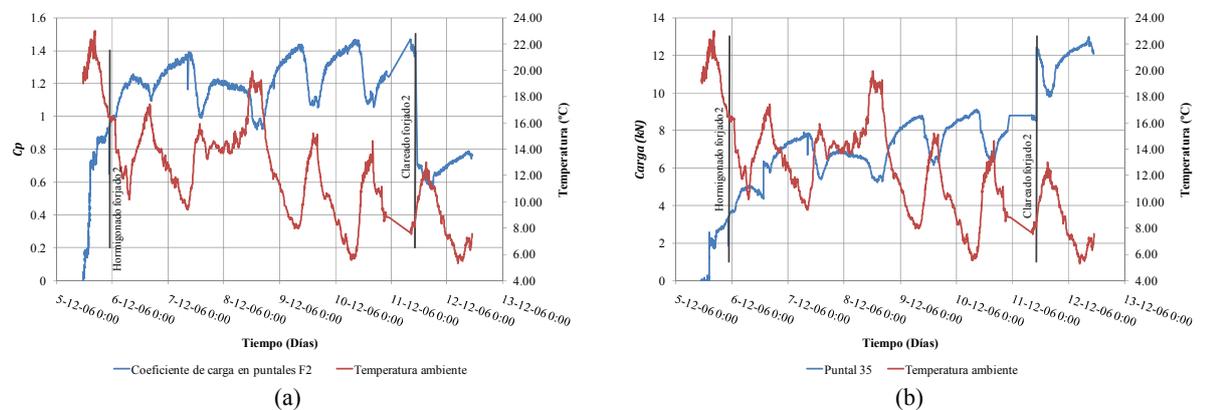


Fig. 4.50 (a) Coeficiente de carga media en puntales del forjado 2 antes del descimbrado del forjado 1. (b) Carga en el puntal 35 antes del descimbrado del forjado 1

Las Figuras 4.51 y 4.52 muestran la distribución de cargas de los forjados 1 y 2 una vez clareado el forjado 2 y en el instante anterior al descimbrado del forjado 1.

Comparando las cargas de los puntales de ambos forjados en los dos instantes de tiempo, no se observan grandes diferencias. Esto es motivado a que las temperaturas una vez clareado el forjado y antes del descimbrado del forjado 1 son muy similares. Presentándose tan solo una diferencia de 0.25°C entre las dos fases consideradas.

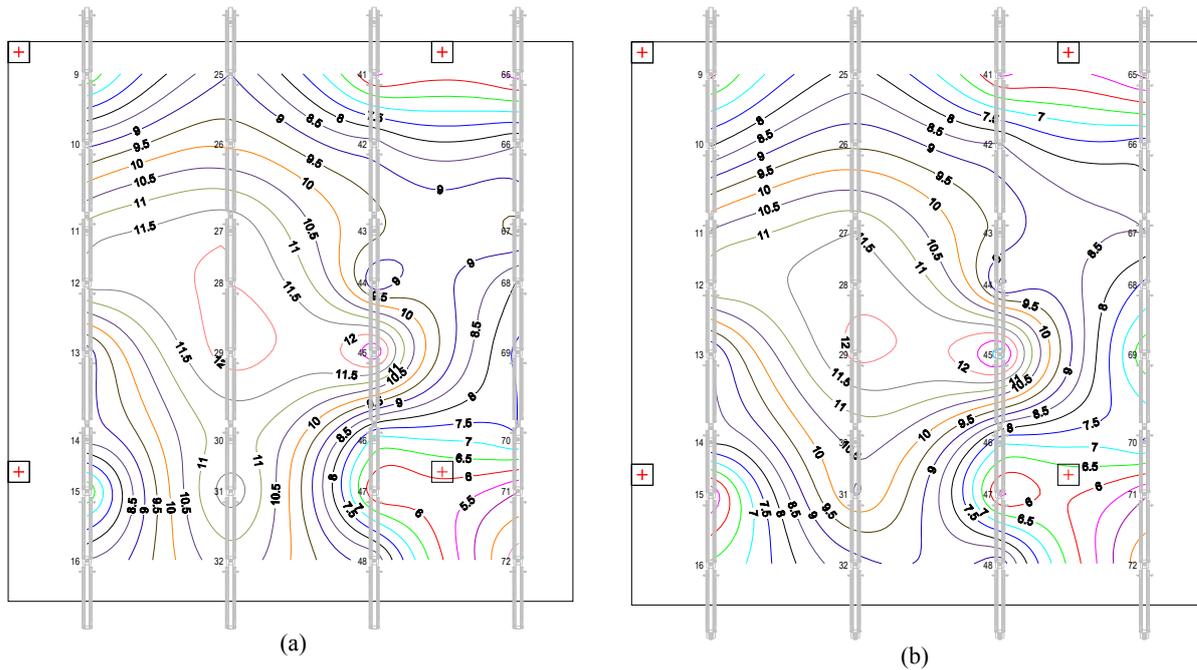


Fig. 4.51 Resultados medición continua isólineas de carga en puntales del forjado 1. (a) Clareado del forjado 2. (b) Antes del descimbrado del forjado 1 (kN)

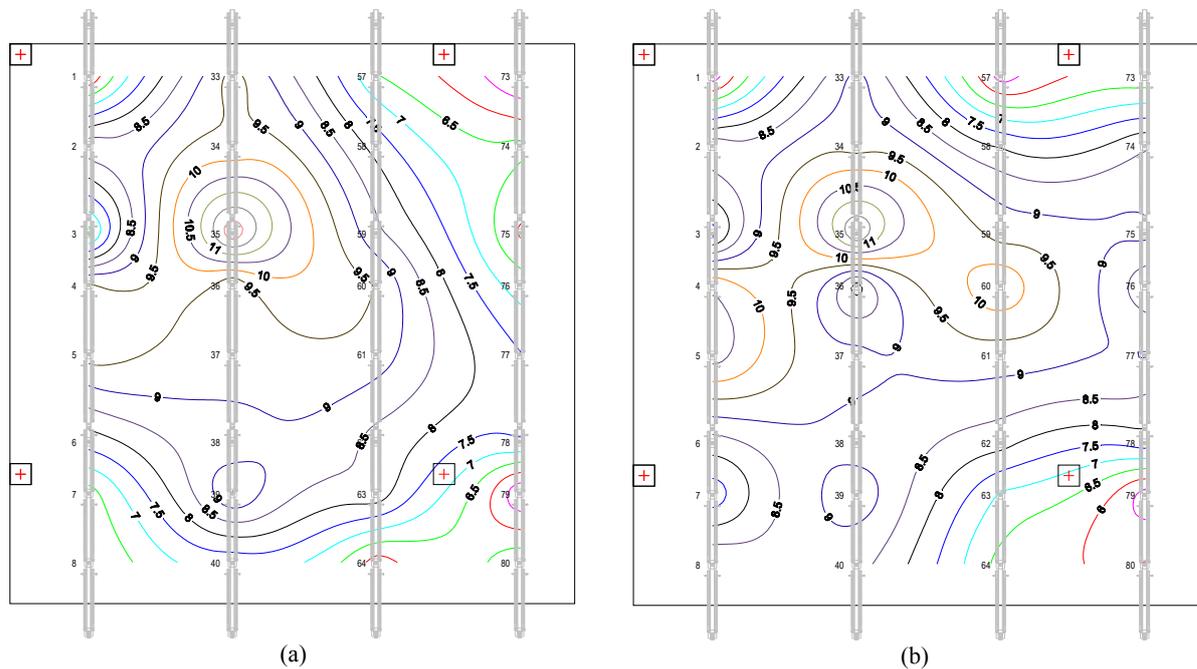
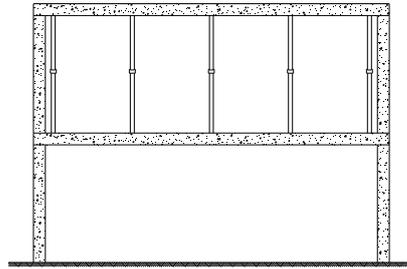


Fig. 4.52 Resultados medición continua isólineas de carga en puntales del forjado 2. (a) Clareado del forjado 2. (b) Antes del descimbrado del forjado 2 (kN)

#### 4.3.5. Descimbrado del forjado 1

El día siguiente al clareado del segundo forjado, se descimbró el primer forjado. La Figura 4.53 muestra las mediciones obtenidas.

$C_f = 0.49$   
 $C_p = 0.51$   
 $C_f = 1.51$   
 $T = 9.60^\circ\text{C}$



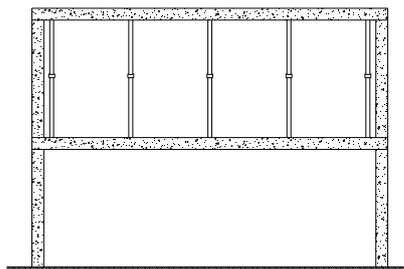
Número de puntas 32  
 $A_{total} = 61.64 \text{ m}^2$   
 $q_{med} = 2.89 \text{ kN/m}^2$   
 Puntal más cargado Puntal 35  
 $A_t = 2.02 \text{ m}^2$   
 $P_{max} = 7.89 \text{ kN}$   
 $q_{max} = 3.91 \text{ kN/m}^2$

Fig. 4.53 Resultados medición continua. Descimbrado del forjado 1

Como consecuencia del descimbrado del forjado 1, la carga soportada por los dos forjados se incrementa. Esta carga no se reparte de la misma forma en los dos forjados. El forjado 1 asume el 75% de la carga que soportaban los puntales bajo éste, y el forjado 2 el 25% de carga restante. La carga máxima de los puntales bajo el forjado 2 continua presentándose en el puntal 35, soportando 0.69 veces la carga del peso propio del forjado, para el área tributaria de forjado que éste puntal soporta.

Posterior al descimbrado del primer forjado, transcurridos 3 días, se hormigonó el tercer forjado. La Figura 4.54 muestra un resumen de las medidas tomadas en el intervalo de tiempo entre el descimbrado del forjado 1 e instantes antes de hormigonar el forjado 3.

Max Min Med  
 $C_f$  0.62 0.39 0.51  
 $C_p$  0.61 0.38 0.49  
 $C_f$  1.61 1.38 1.49  
 $\bar{T} = 10.47^\circ\text{C}$



Puntal más cargado Puntal 35  
 $A_t = 2.02 \text{ m}^2$   
 $P_{max,p+} = 9.45 \text{ kN}$   
 $q_{max,p+} = 4.68 \text{ kN/m}^2$   
 $\bar{q}_{p+} = 3.90 \text{ kN/m}^2$   
 $q_{min,p+} = 3.04 \text{ kN/m}^2$

Fig. 4.54 Resultados medición continua. Entre el descimbrado del forjado 1 y antes del hormigonado del forjado 3

Durante el lapso de tiempo entre el descimbrado del forjado 1 y antes de iniciar el hormigonado del tercer forjado, la carga media por unidad de superficie en los puntales del forjado 2 varió entre 0.38 y 0.61 veces el peso propio del forjado. Esto para diferencias de temperatura de máximo  $9.12^\circ\text{C}$ .

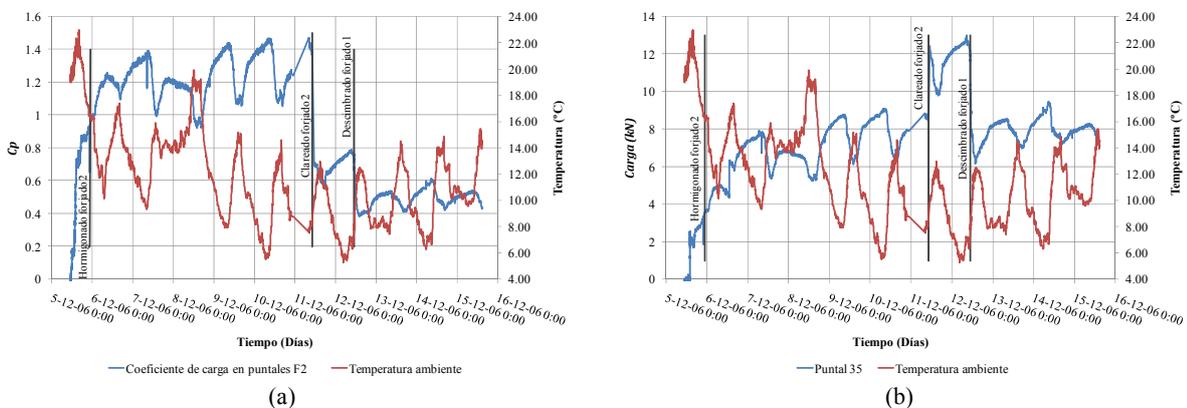


Fig. 4.55 (a) Coeficiente de carga media en puntales del forjado 2 antes del hormigonado del forjado 3. (b) Carga en el puntal 35 antes del hormigonado del forjado 3

La carga máxima durante el periodo de tiempo considerado siempre se presentó en el puntal 35. La carga en dicho puntal llegó a un máximo de 9.45 kN, que se corresponde a 0.83 veces el peso propio del forjado, para el área tributaria de forjado que éste puntal soporta.

La Figura 4.55 (a) muestra la variación del coeficiente de carga, y la Figura 4.55 (b) la variación de carga del puntal 35.

La distribución de cargas en los puntales del forjado 2 se muestra en la Figura 4.56, para el momento de descimbrado del primer forjado y antes de hormigonar el tercer forjado. A diferencia que en los casos anteriores, entre el inicio y el final del periodo de tiempo considerado, se presentó un descenso en la carga de los puntales. Este descenso de carga fue resultado del incremento en 2.18°C de la temperatura ambiente.

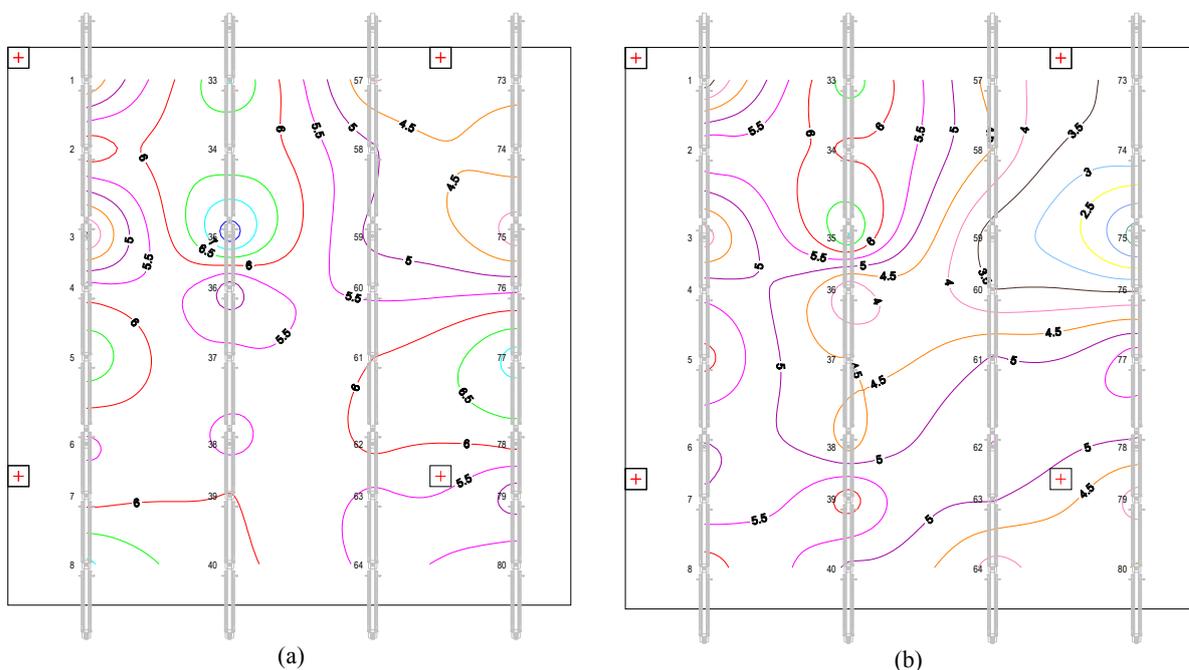


Fig. 4.56 Resultados medición continua isocargas en puntales del forjado 2. (a) Descimbrado del forjado 1. (b) Antes del hormigonado del forjado 3 (kN)

### 4.3.6. Hormigonado del forjado 3

3 días después del descimbrado del forjado 1, se hormigonó el forjado 3. Un resumen de las medidas tomadas una vez hormigonado el forjado 3 se muestra en la Figura 4.57.

El peso del forjado 3 fue asumido por el conjunto de puntales que transmiten la carga a los forjados 1 y 2. Así, el forjado 1 asumió 9.59 kN/m<sup>2</sup>, y el forjado 2 7.72 kN/m<sup>2</sup>. La carga máxima en los puntales del forjado 2 se mantuvo en el puntal 35, llegando a soportar 1.00 veces el peso propio del forjado, respecto al área tributaria que le corresponde. En el caso de los puntales del forjado 3, el puntal más cargado fue el puntal 18 que soportó 1.38 veces el peso propio del forjado respecto al área tributaria que le corresponde.

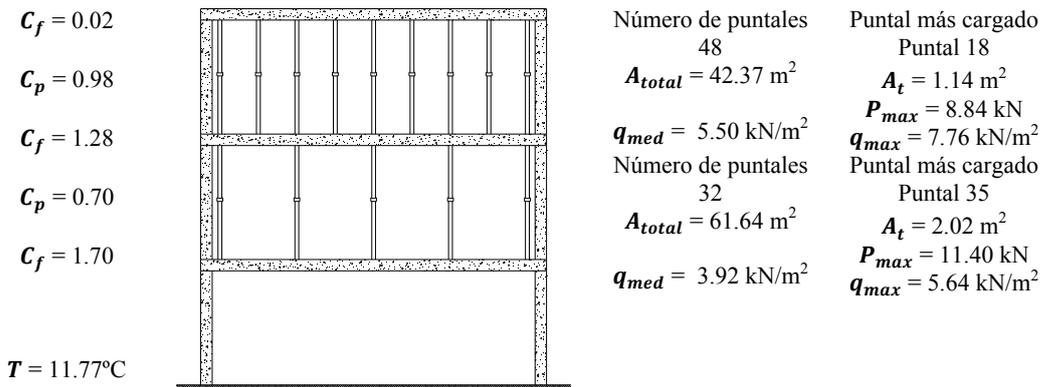


Fig. 4.57 Resultados medición continua. Hormigonado del forjado 3

Una vez hormigonado el forjado 3, durante los siguientes 3 días, se tomó medidas de las cargas en los puntales, hasta el instante anterior al clareado de éste mismo forjado. Un resumen de éstas medidas se muestra en la Figura 4.58.

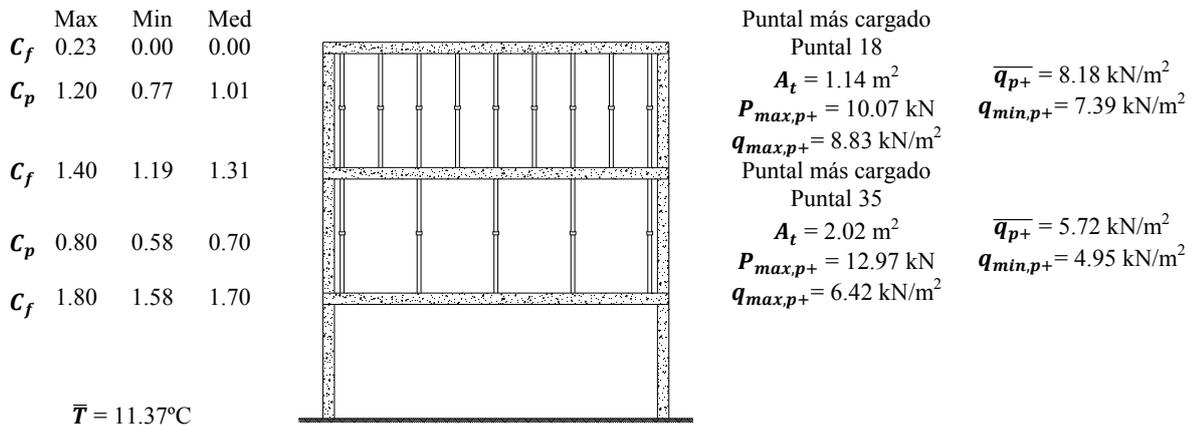


Fig. 4.58 Resultados medición continua. Entre el hormigonado del forjado 3 y antes del clareado del forjado 3

En el intervalo de tiempo considerado, las cargas por unidad de superficie en los puntales del forjado 2 y del forjado 3 llegaron a máximas de  $4.51 \text{ kN/m}^2$  y  $6.77 \text{ kN/m}^2$  respectivamente, y a unas mínimas de  $3.27 \text{ kN/m}^2$  para el forjado 2 y  $4.34 \text{ kN/m}^2$  para el forjado 3. Este rango de carga asumida por los puntales se corresponde a una diferencia máxima de temperatura ambiente de  $11.61^\circ\text{C}$ .

El puntal más cargado en ambos forjados se mantuvo en la misma posición. En el caso del forjado 3, el puntal que presentó la carga máxima fue el puntal 18, alcanzando una carga máxima de  $10.07 \text{ kN}$  que se corresponde a 1.57 veces el peso propio del forjado para un área tributaria de  $1.14 \text{ m}^2$ . En el forjado 2 la carga máxima la tuvo el puntal 35, soportando  $12.97 \text{ kN}$  que se corresponde a 1.14 veces el peso propio del forjado para un área tributaria de  $2.02 \text{ m}^2$ .

Las Figuras 4.59 y 4.61 (a) muestran la evolución del coeficiente de carga en puntales para los forjados 2 y 3. Las Figuras 4.60 y 4.61 (b) muestran el comportamiento de la carga en los puntales que presentaron el valor máximo de carga para los dos forjados.

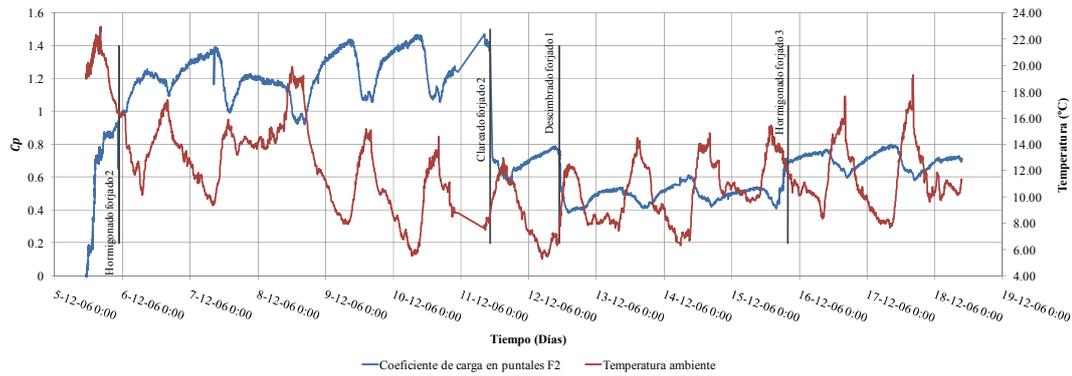


Fig. 4.59 Coeficiente de carga media en puntales del forjado 2 antes del clareado del forjado 3

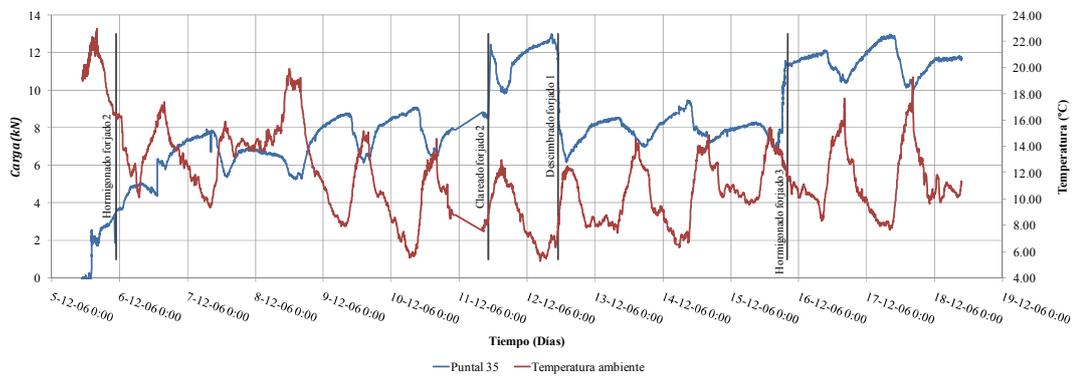


Fig. 4.60 Carga en el puntal 35 antes del clareado del forjado 3

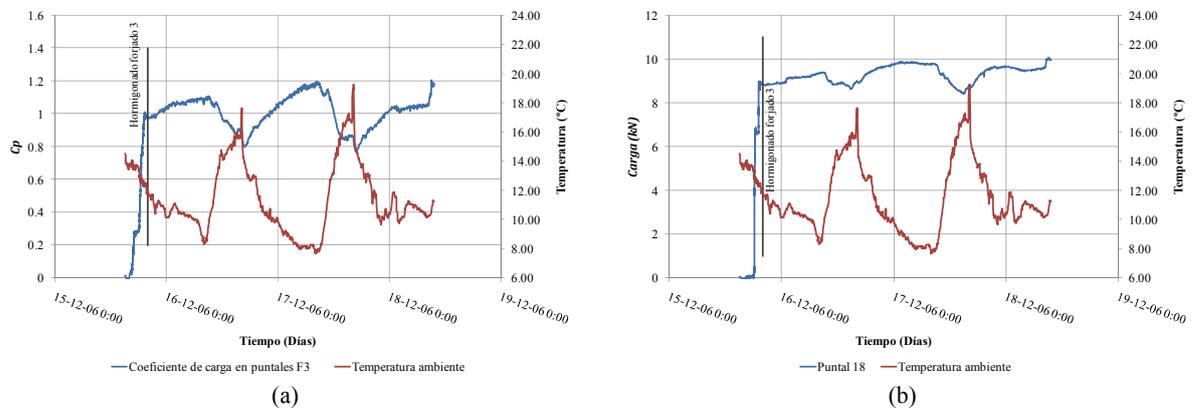


Fig. 4.61 (a) Coeficiente de carga media en puntales del forjado 3 antes del clareado del forjado 3. (b) Carga en el puntal 18 antes del clareado del forjado 3

La distribución de cargas en los puntales de los forjados 2 y 3 es la que se muestra en las Figuras 4.62 y 4.63. En el caso de los puntales del forjado 2 la distribución apenas cambia al igual que los valores de las cargas en los puntales. En el forjado 3 se aprecia que los puntales se encuentran más cargados al final del periodo de tiempo considerado. La diferencia en la temperatura ambiente de los dos instantes analizados fue de 0.22°C.

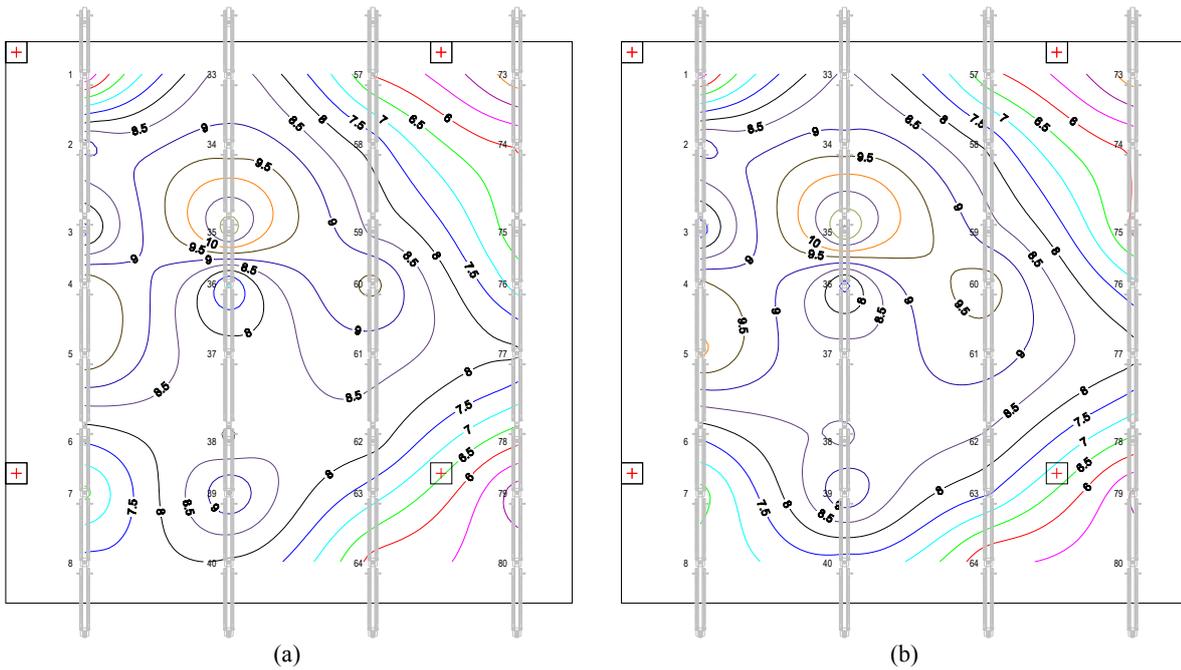


Fig. 4.62 Resultados medición continua isolíneas de carga en puntales del forjado 2. (a) Hormigonado del forjado 3. (b) Antes del clareado del forjado 3 (kN)

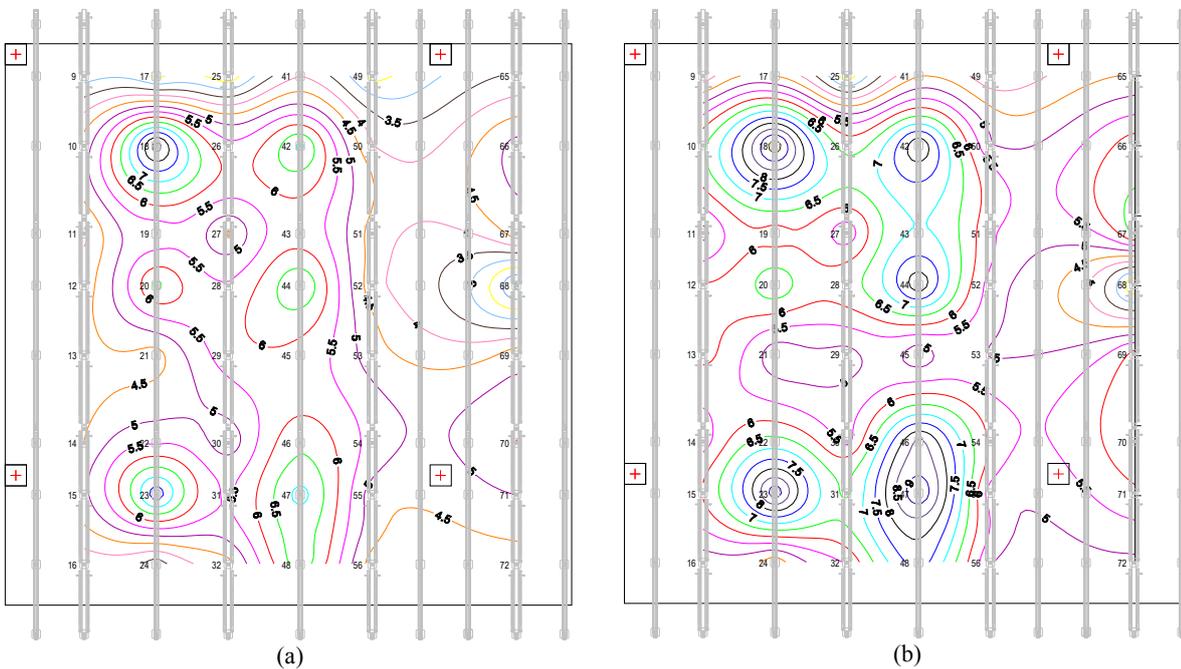


Fig. 4.63 Resultados medición continua isolíneas de carga en puntales del forjado 3. (a) Hormigonado del forjado 3. (b) Antes del clareado del forjado 3 (kN)

### 4.3.7. Clareado del forjado 3

Después de seis días del hormigonado del forjado 3 se procedió a clarear dicho forjado. La Figura 4.64 muestra un resumen de las medidas obtenidas.

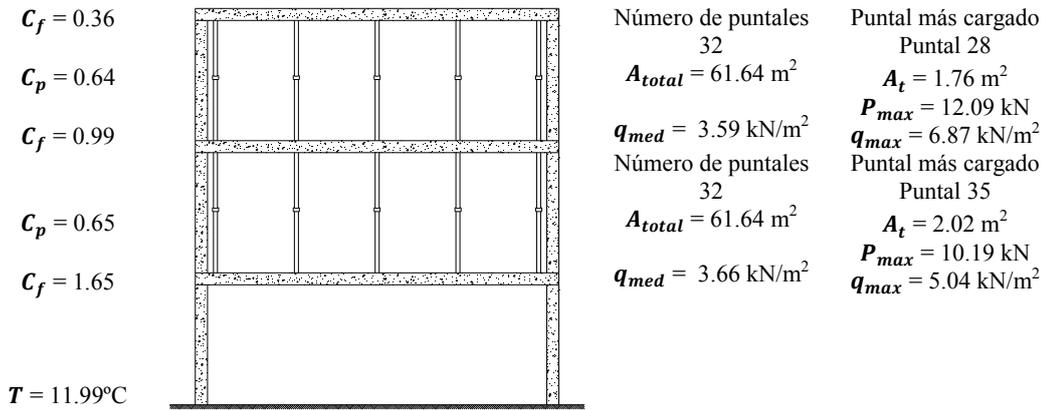


Fig. 4.64 Resultados medición continua. Clareado del forjado 3

De la misma forma que en el clareado de los forjados 1 y 2, al clarear el forjado 3 éste asume una fracción importante de su peso propio. En éste caso el forjado asumió el 36% de su peso propio quedando el 64% restante en los puntales que transmiten la carga a los forjados inferiores. La carga máxima en los puntales del forjado 2 se presentó en el puntal 35, que soportó 0.89 veces el peso propio del forjado en relación al área tributaria del forjado que le corresponde (2.02 m<sup>2</sup>). En los puntales del forjado 3, la carga máxima la tuvo el puntal 28, soportando 12.09 kN correspondientes a 1.22 veces el peso propio del forjado para un área tributaria de 1.76 m<sup>2</sup>.

Una vez clareado el forjado 3, después de 4 días se aplicó una carga sobre éste forjado mediante el uso de balsas de agua. La Figura 4.65 muestra las medidas tomadas durante el intervalo de tiempo entre el clareado del forjado y el instante anterior a la aplicación de dicha carga.

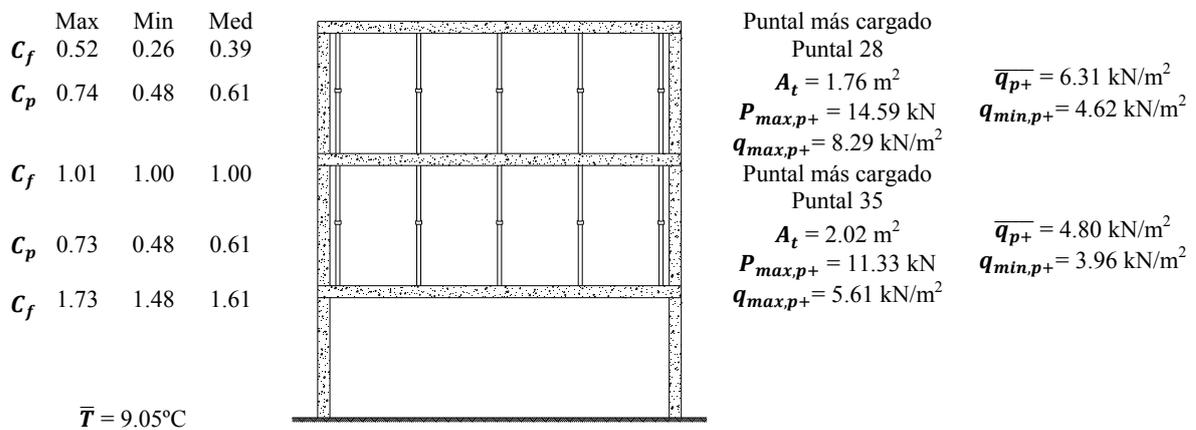


Fig. 4.65 Resultados medición continua. Entre el clareado del forjado 3 y antes la carga en el forjado 3

Durante los 3 días entre el clareado del 3 forjado y antes de la aplicación de la carga en éste forjado, la carga media en puntales por unidad de superficie en el forjado 2 varió entre 2.71 kN/m<sup>2</sup> y 4.12 kN/m<sup>2</sup>, y para los puntales del forjado 3 entre 2.71 kN/m<sup>2</sup> y 4.17 kN/m<sup>2</sup>. Las variaciones de carga en los dos forjados son muy similares. Esto debido a que los dos forjados se encontraban clareados, y ambos se encuentran afectados por las mismas diferencias de temperatura. La temperaturas mínima y máxima en éste intervalo de tiempo fueron de 4.30 y 15.35°C.

La Figura 4.66 muestra la variación de coeficiente de carga en los puntales del forjado 2, y la Figura 4.67 la variación de carga para el puntal 35, puntal que presentó el máximo valor de carga para éste forjado. La Figura 4.68 (a) muestra la variación del coeficiente de carga para los puntales del forjado 3, y la Figura 4.68 (b) la variación de carga en el puntal 28 que tuvo el valor máximo de carga.

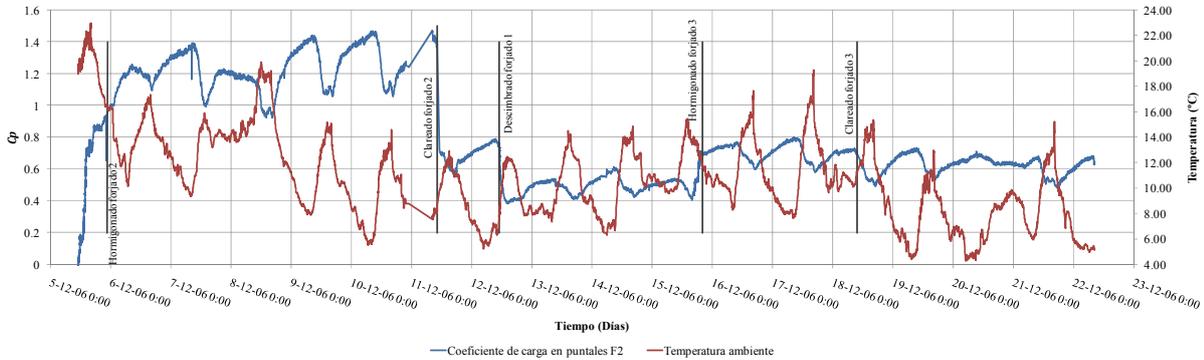


Fig. 4.66 Coeficiente de carga media en puntales del forjado 2 antes de la carga en el forjado 3

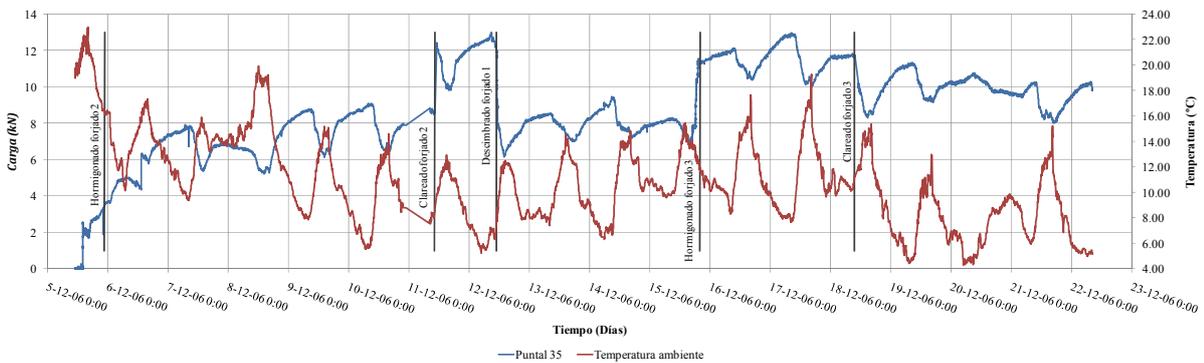


Fig. 4.67 Carga en el puntal 35 antes de la carga en el forjado 3

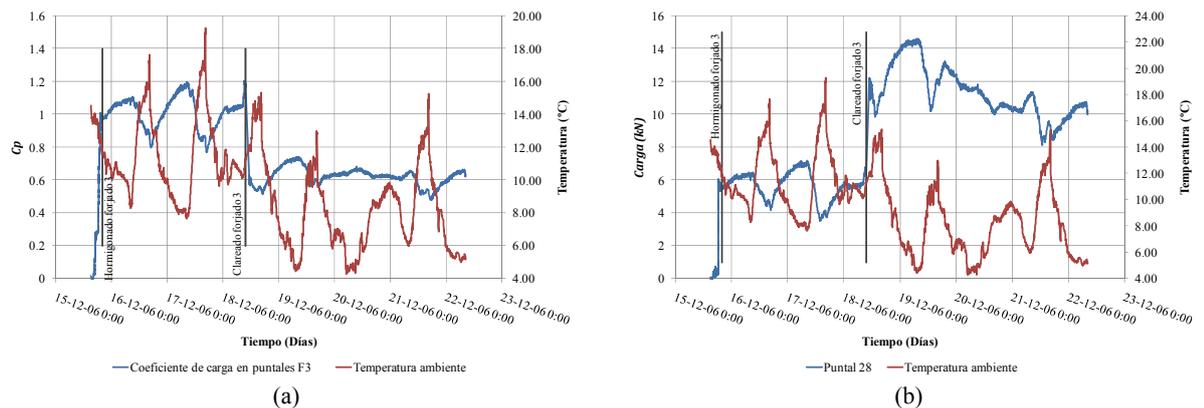


Fig. 4.68 (a) Coeficiente de carga media en puntales del forjado 3 antes de la carga en el forjado 3. (b) Carga en el puntal 28 antes de la carga en el forjado 3

Las Figuras 4.69 y 4.70 muestran la distribución de cargas de los puntales de los forjados 2 y 3.

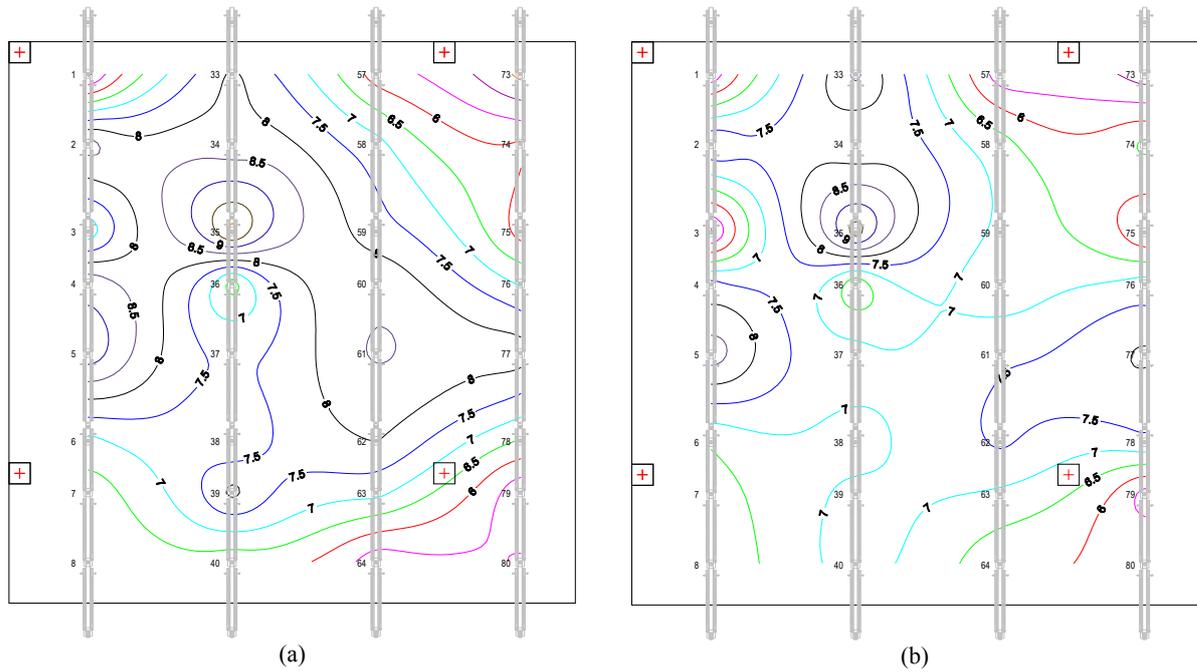


Fig. 4.69 Resultados medición continua isólineas de carga en puntales del forjado 2. (a) Clareado del forjado 3. (b) Antes de la carga en el forjado 3 (kN)

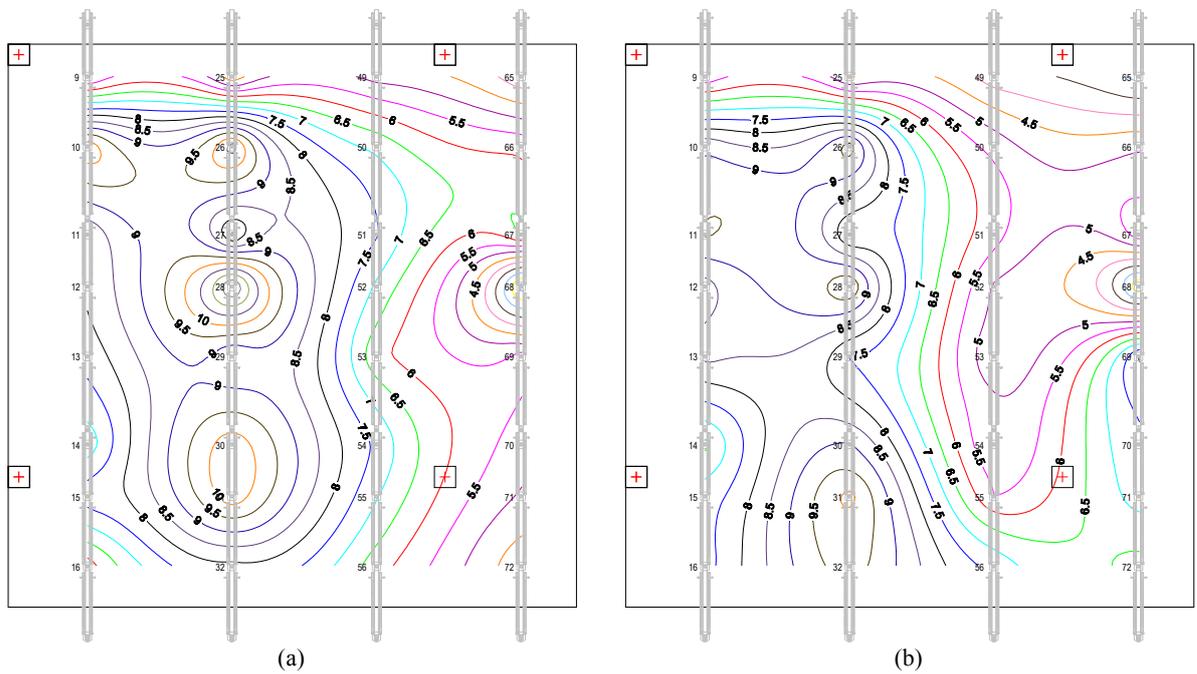


Fig. 4.70 Resultados medición continua isólineas de carga en puntales del forjado 3. (a) Clareado del forjado 3. (b) Antes de la carga en el forjado 3 (kN)

### 4.3.8. Carga en el forjado 3

En el forjado 3 se aplicó una carga uniforme de  $3.70 \text{ kN/m}^2$  usando balsas de agua. Suponiendo que el incremento que se produce al aplicar ésta carga es proporcional al producido al aplicar cualquier carga,

la Figura 4.71 muestra un resumen de los resultados obtenidos considerando una carga igual al peso propio de los demás forjados ( $5.64 \text{ kN/m}^2$ ).

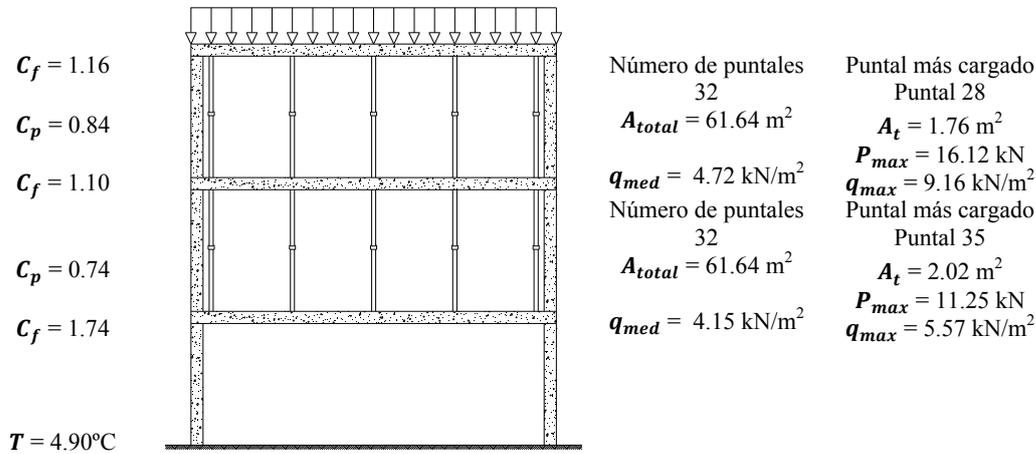


Fig. 4.71 Resultados medición continua. Carga en el forjado 3

El 80% de la carga aplicada sobre el forjado 3 fue asumida por éste mismo. Siendo el 20% de carga restante distribuida entre los forjados inferiores. El puntal 28 del forjado 3 presentó la carga máxima del conjunto de puntales bajo dicho forjado alcanzando una carga de  $16.12 \text{ kN}$  ( $1.62$  veces el peso propio del forjado para un área tributaria de  $1.76 \text{ m}^2$ ). En el forjado 2, el puntal con la carga máxima fue el puntal 35, que tuvo una carga de  $11.25 \text{ kN}$  correspondiente a  $0.99$  veces el peso propio del forjado para un área tributaria de  $2.02 \text{ m}^2$ .

Una vez aplicada la carga, después de 4 días se descimbró el segundo forjado. La Figura 4.72 muestra un resumen de las medidas obtenidas en el transcurso de estos 4 días hasta el instante anterior del descimbrado del segundo forjado.

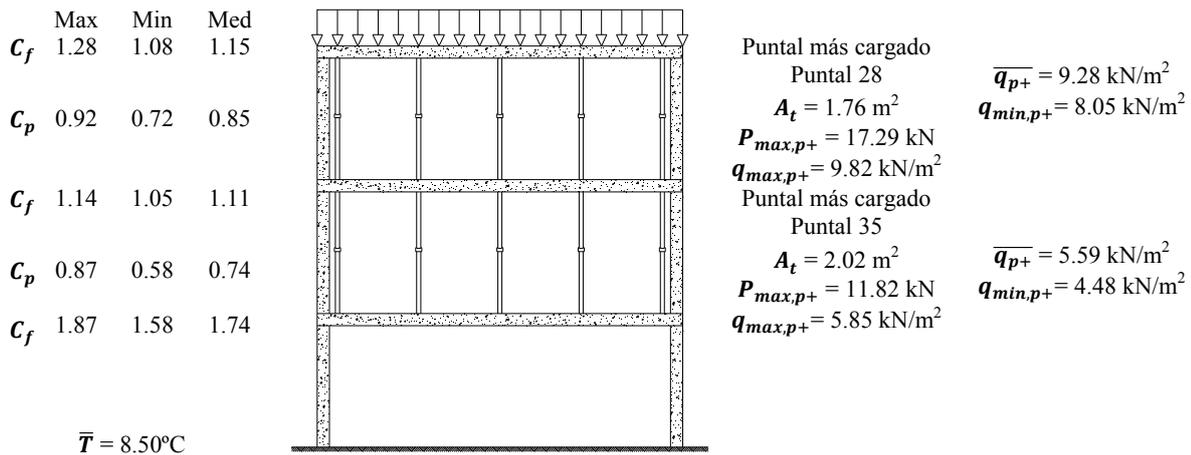


Fig. 4.72 Resultados medición continua. Entre la carga del forjado 3 y antes del descimbrado del forjado 2

La carga media en puntales por unidad de superficie en el forjado 2 llegó a un máximo de  $4.90 \text{ kN/m}^2$  y un mínimo de  $3.27 \text{ kN/m}^2$ . En el forjado 3 la carga media en puntales por unidad de superficie osciló entre  $5.19 \text{ kN/m}^2$  y  $4.06 \text{ kN/m}^2$ . Las temperaturas mínima y máxima para el intervalo de tiempo considerado fueron de  $4.61$  y  $12.96^\circ\text{C}$ .

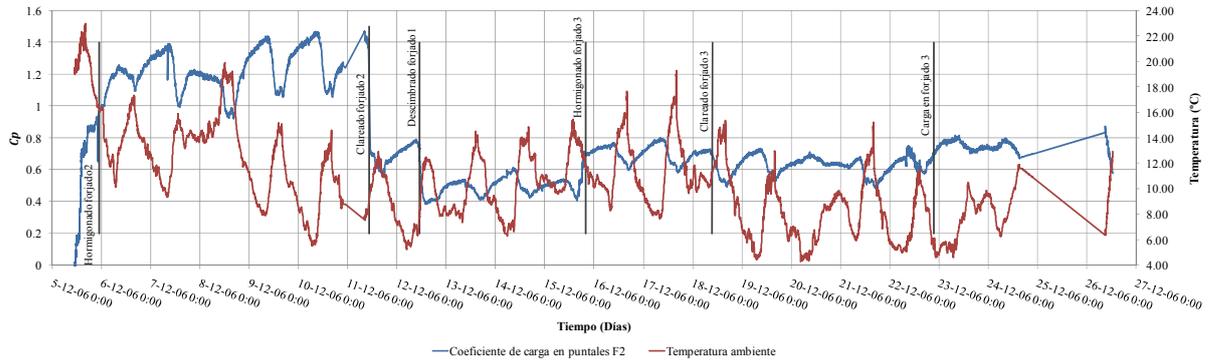


Fig. 4.73 Coeficiente de carga media en puntales del forjado 2 antes del descimbado del forjado 2

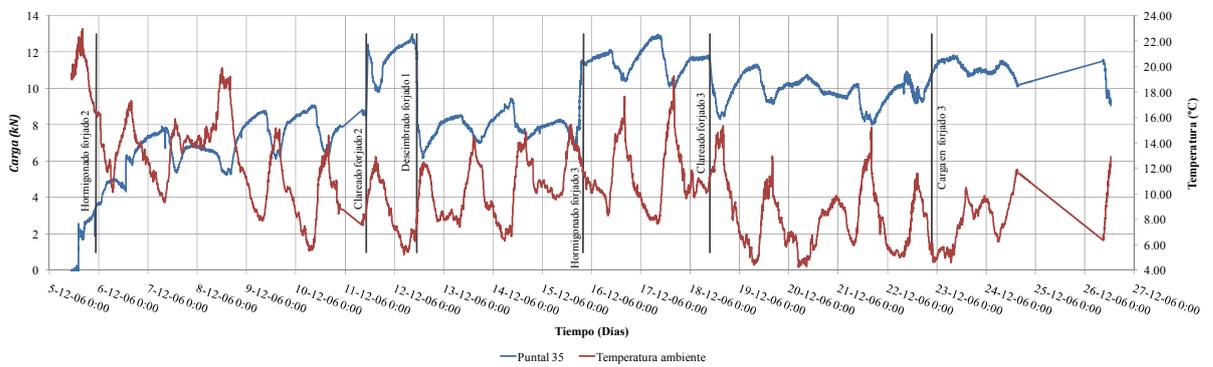


Fig. 4.74 Carga en el puntal 35 antes del descimbado del forjado 2

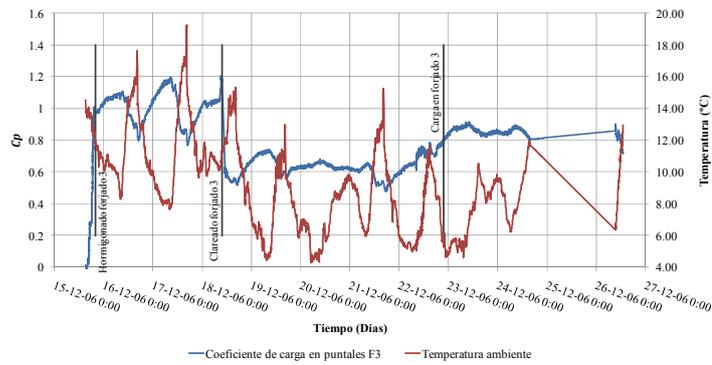


Fig. 4.75 Coeficiente de carga media en puntales del forjado 3 antes del descimbado del forjado 2

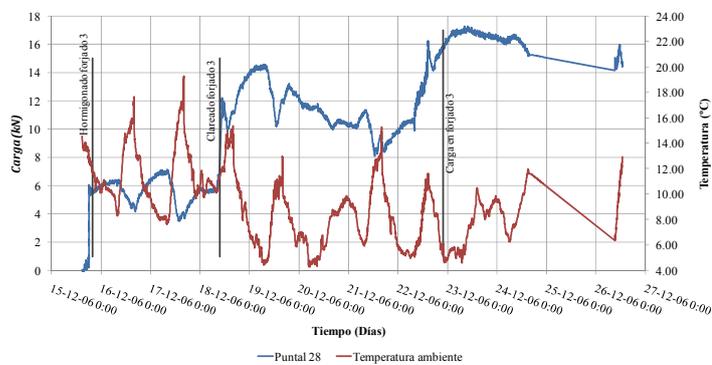


Fig. 4.76 Carga en el puntal 28 antes del descimbado del forjado 2

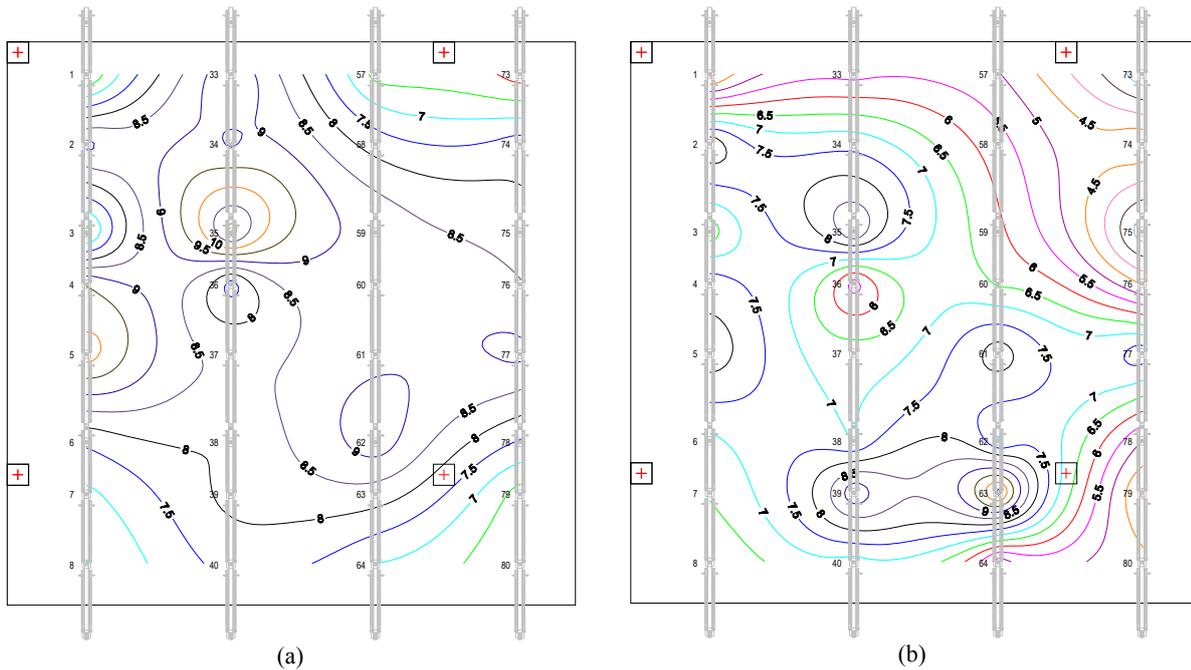


Fig. 4.77 Resultados medición continua isólinas de carga en puntales del forjado 2. (a) Carga en el forjado 3. (b) Antes del descimbrado del forjado 2 (kN)

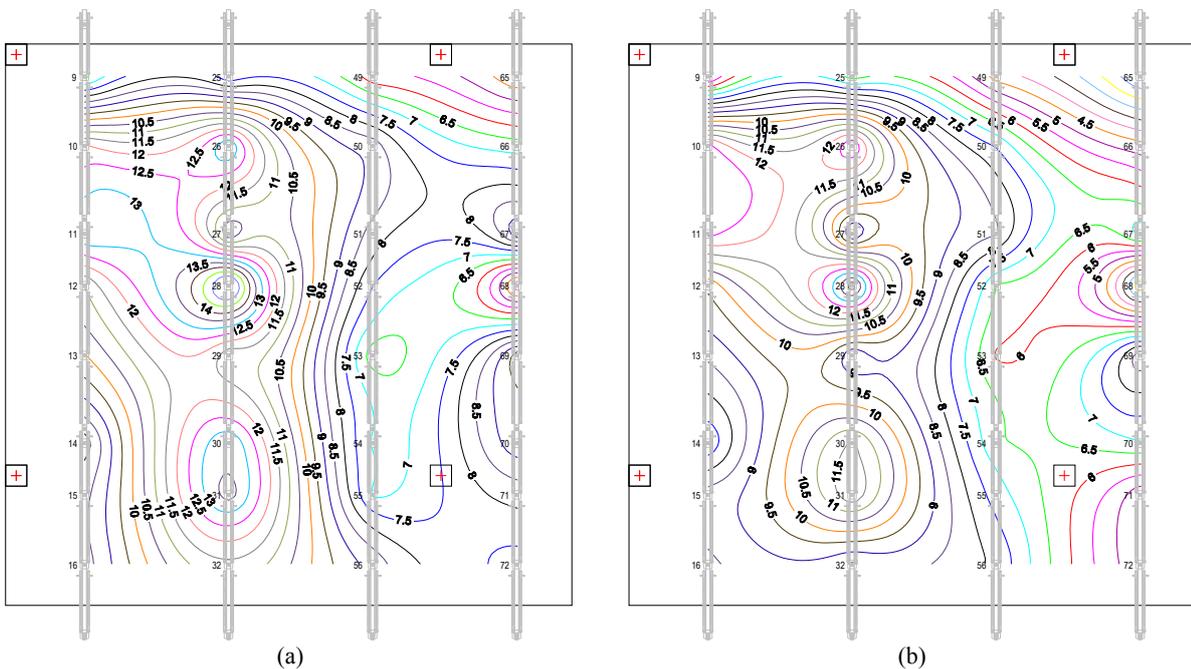


Fig. 4.78 Resultados medición continua isólinas de carga en puntales del forjado 3. (a) Carga en el forjado 3. (b) Antes del descimbrado del forjado 2 (kN)

La Figura 4.73 muestra la variación del coeficiente de carga media en los puntales del forjado 2 y la Figura 4.74 la variación de la carga en el puntal 35 que presentó el valor de carga máxima para éste forjado. La Figura 4.75 muestra la variación del coeficiente de carga media en los puntales del forjado 3 y la Figura 4.76 la variación de carga en el puntal 28 que tenía el valor máximo de carga para éste forjado.

La distribución de cargas en los puntales de los forjados 2 y 3, en el periodo de tiempo considerado, es la que se muestra en las Figuras 4.77 y 4.78 respectivamente.

### 4.3.9. Descimbrado del forjado 2

Terminando con la medición continua se descimbró el forjado 2. La Figura 4.79 muestra un resumen de las mediciones obtenidas al descimbrar el forjado 2.

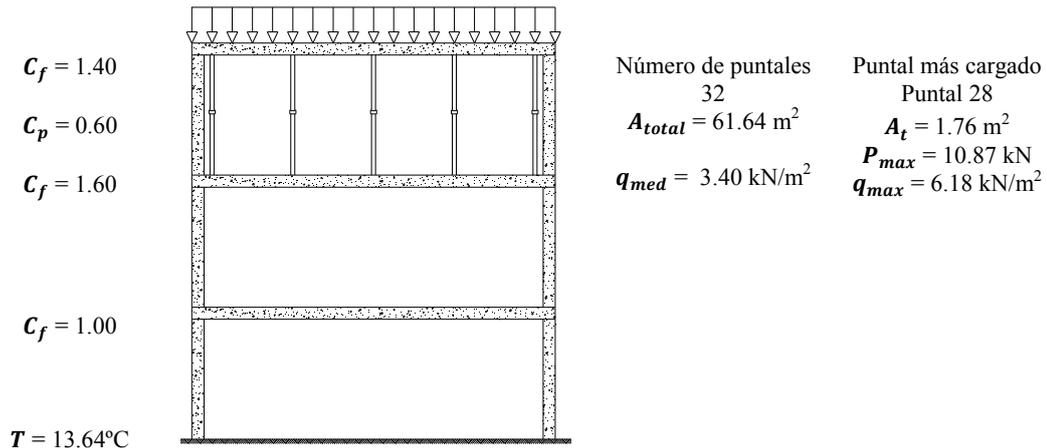


Fig. 4.79 Resultados medición continua. Descimbrado del forjado 2

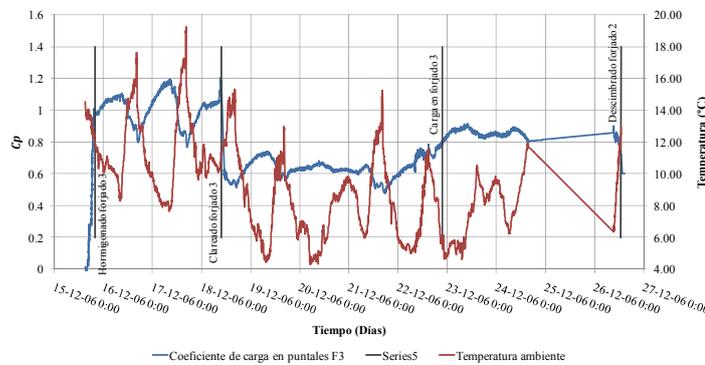


Fig. 4.80 Coeficiente de carga media en puntales del forjado 3 hasta el final de las operaciones constructivas

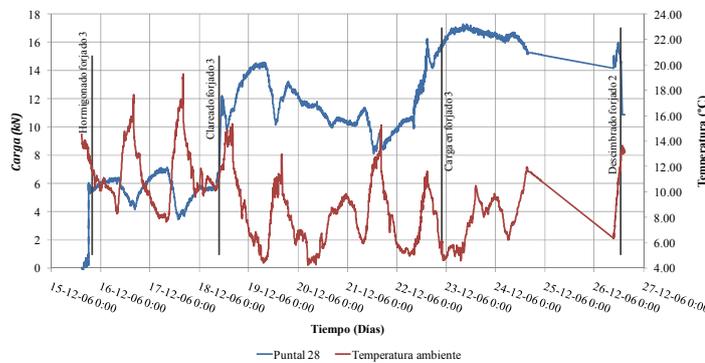


Fig. 4.81 Carga en el puntal 28 hasta el final de las operaciones constructivas

Al retirar los puntales bajo el forjado 2 la carga que éstos tenían se repartió entre los forjados superiores conectados con puntales. Así, el forjado 2 asumió el 68% de la carga de dichos puntales y el forjado 3 el 32% restante. La carga máxima de los puntales del forjado 3 continuo en el puntal 28, reduciéndose a 10.87 kN que se corresponden a 1.10 veces el peso propio del forjado para un área tributaria de 1.76 m<sup>2</sup>.

La Figura 4.80 muestra la evolución del coeficiente de carga media para los puntales del forjado 3, y la Figura 4.81 la carga en el puntal 28 que presentó el valor máximo de carga.

La distribución de cargas en los puntales del forjado 3 es la que se muestra en la Figura 4.82.

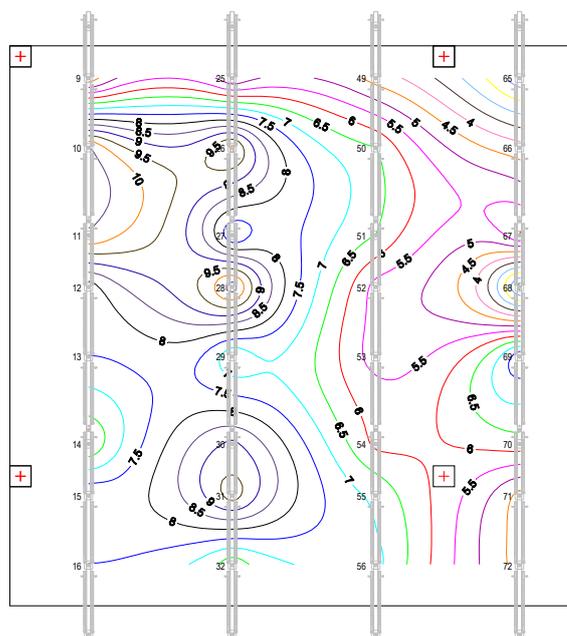


Fig. 4.82 Resultados medición continua isocargas en puntales del forjado 3. Descimbrado forjado 2

#### 4.3.10. Resumen medición continua

La Tabla 4.2 muestra un resumen de la medición continua. En esta Tabla se muestran las medidas tomadas en cada una de las operaciones constructivas, y las medidas correspondientes al tiempo que transcurre entre una operación y otra. Para cada una de las operaciones constructivas se muestra: la carga media en puntales por unidad de superficie ( $q_{med}$ ), el coeficiente de carga en puntales ( $C_p$ ), el coeficiente de carga en forjados ( $C_f$ ), el número del puntal más cargado, la carga máxima por unidad de superficie del puntal más cargado ( $q_{max,p+}$ ) y el coeficiente de carga del puntal más cargado ( $C_{p,max}$ ). Para las medidas tomadas entre dos operaciones constructivas consecutivas se muestran los mismos datos anteriormente mencionados pero dando los valores máximos y mínimos para cada una de las cargas y coeficientes de carga obtenidos.

Tabla 4.2 Resumen medición continua

Operación	Nivel	$q_{med}$ (kN/m <sup>2</sup> )		$C_p$		$C_f$		Puntal más cargado	$q_{max,p+}$ (kN/m <sup>2</sup> )		$C_{p,max}$	
		Max	Min	Max	Min	Max	Min		Max	Min	Max	Min
1 Hormigonado forjado 1	1	5.46		0.97		0.03		18	6.77		1.20	
	Entre 1 y 2	1	6.66	3.95	1.18	0.70	0.30	0.00	22	9.52	7.16	1.69
2 Clareado forjado 1	1	2.87		0.51		0.49		28	4.51		0.80	
	Entre 2 y 3	1	2.99	1.75	0.53	0.31	0.69	0.47	48	4.36	1.66	0.77
3 Hormigonado forjado 2	2	5.60		0.99		0.01		18	7.56		1.34	
	1	4.03		0.72		1.27		27	6.33		1.12	
	Entre 3 y 4	2	8.29	5.19	1.47	0.92	0.08	0.00	18	8.76	6.79	1.55
4 Clareado forjado 2	1	5.41	3.95	0.96	0.70	1.51	1.22	45	6.98	4.92	1.24	0.87
	2	4.07		0.72		0.28		35	6.16		1.09	
	1	4.54		0.81		0.91		45	5.70		1.01	
	Entre 4 y 5	2	4.46	3.16	0.79	0.56	0.44	0.21	35	6.44	4.85	1.14
5 Descimbrado forjado 1	1	4.57	3.61	0.81	0.64	0.98	0.92	45	6.15	5.06	1.09	0.90
	2	2.89		0.51		0.49		35	3.91		0.69	
	1					1.51						
	Entre 5 y 6	2	3.44	2.14	0.61	0.38	0.62	0.39	35	4.68	3.04	0.83
6 Hormigonado forjado 3	1					1.61		1.39				
	3	5.50		0.98		0.02		18	7.76		1.38	
	2	3.92		0.70		1.28		35	5.64		1.00	
	1					1.70						
7 Clareado forjado 3	3	6.77	4.34	1.20	0.77	0.23	0.00	18	8.83	7.39	1.57	1.31
	2	4.51	3.27	0.80	0.58	1.40	1.19	35	6.42	4.95	1.14	0.88
	1					1.80		1.58				
	3	3.59		0.64		0.36		28	6.87		1.22	
8 Carga forjado 3	2	3.66		0.65		0.99		35	5.04		0.89	
	1					1.65						
	3	4.17	2.71	0.74	0.48	0.52	0.26	28	8.29	4.62	1.47	0.82
	2	4.12	2.71	0.73	0.48	1.01	1.00	35	5.61	3.96	1.00	0.70
9 Descimbrado forjado 2	1					1.73		1.48				
	3	4.72		0.84		1.16		28	9.16		1.62	
	2	4.15		0.74		1.10		35	5.57		0.99	
	1					1.74						
8 Carga forjado 3	3	5.19	4.06	0.92	0.72	1.28	1.08	28	9.82	8.05	1.74	1.43
	2	4.91	3.27	0.87	0.58	1.14	1.05	35	5.85	4.48	1.04	0.79
	1					1.87		1.58				
9 Descimbrado forjado 2	3	3.40		0.60		1.40		28	6.18		1.10	
	2					1.60						

#### 4.4. Conclusiones relativas a los resultados del estudio experimental

En este Capítulo se han detallado las mediciones realizadas en la ejecución del modelo experimental. Dichas mediciones han permitido conocer como se transmitieron las cargas entre forjados y puntales durante la construcción del modelo experimental en un proceso de cimbrado, clareado y descimbrado.

Las mediciones han sido expresadas en dos partes: mediciones instantáneas y mediciones continuas. Esto con el fin de aislar los efectos producidos por las operaciones constructivas, de los efectos producidos sobre todo por los cambios de temperatura. En las medidas instantáneas se observan los incrementos de carga respecto al punto de partido en el momento de llevar a cabo una operación constructiva (hormigonado, clareado o descimbrado).

De las mediciones instantáneas se concluye:

- Al hormigonar cada forjado, la totalidad de la carga fue transmitida a los puntales. Por ejemplo, al hormigonar el forjado 1 la carga media en los puntales ( $q_{med}$ ) fue de 5.46 KN/m<sup>2</sup> valor que difiere solamente en un 3 % del peso propio teórico del forjado (5.64 KN/m<sup>2</sup>). De la misma forma la  $q_{med}$  medida al hormigonar el forjado 2 fue de 5.60 KN/m<sup>2</sup> valor que difiere en menos del 1 % del peso propio teórico del forjado. Además, la medida de  $q_{med}$  al hormigonar el forjado 3 fue de 5.83 KN/m<sup>2</sup> valor que difiere en un 2% al de su peso propio teórico. Esto refleja el grado de precisión de las medidas obtenidas durante el ensayo.
- Al realizar la operación de clareado los tres forjados asumieron una fracción importante de carga. Esto se presentó en los diferentes forjados de la siguiente forma:
  - ✓ Una vez clareado el primer forjado, donde los puntales estaban apoyados en la losa de cimentación, el forjado asumió el 46% de la carga en relación a su peso propio, y los puntales asumieron el 54% de esta carga.
  - ✓ Al clarear el segundo forjado, donde los puntales estaban apoyados en el primer forjado, el forjado asumió el 48% de la carga en relación a su peso propio, y los puntales asumieron el 52% de esta carga.
  - ✓ En el clareado del tercer forjado, donde los puntales estaban apoyados en el segundo forjado, el forjado asumió el 45% de la carga en relación a su peso propio, y los puntales asumieron el 55% de esta carga.
- Al aplicar una carga sobre un forjado ya clareado o al hormigonar forjados superiores sobre inferiores ya clareados, el reparto de cargas fue el siguiente:
  - ✓ Al hormigonar el forjado 2, la carga transmitida por los puntales colocados bajo dicho forjado fue asumida en un 74% por el forjado 1. El 26% de carga restante fue asumida por los puntales bajo el forjado 1 transmitiéndola a la losa de cimentación.
  - ✓ La carga al hormigonar el forjado 3 se repartió entre los forjados 1 y 2. Así, la carga asumida por el forjado 1 fue del 26% mientras que la carga asumida por el forjado 2 fue del orden del 72% del peso propio del forjado 3.
  - ✓ Al aplicar una carga uniformemente repartida sobre el forjado 3, dicha carga se repartió entre los forjados 1, 2 y 3. La distribución de dicha carga fue del orden de un 11% para el forjado 1, un 11% para el forjado 2 y un 78% para el forjado 3.De los valores anteriores se puede concluir que un forjado clareado asumió como media el 75% de una carga nueva que actuase sobre él, en el experimento realizado.
- Al retirar los puntales de un forjado o descimbrarlo, la carga que asumían dichos puntales se reparte entre los forjados superiores conectados por puntales. En el descimbrado de los forjados 1 y 2 la carga se repartió de la siguiente manera:
  - ✓ Al retirar los puntales bajo el forjado 1, la carga que tenían dichos puntales fue asumida en un 69% por el forjado 1 y el 31% restante por el forjado 2.
  - ✓ En el descimbrado del forjado 2, la carga que tenían los puntales retirados fue asumida en un 80% por el forjado 2 y el 20% restante por el forjado 3.

Los registros obtenidos mediante la medición continua representan la carga real que tienen los puntales para cualquier situación experimental analizada. Sin embargo, estos registros no permiten distinguir con claridad el efecto que las operaciones constructivas tienen sobre la transmisión de cargas. Por este motivo se ha separado el estudio en estas dos partes: medidas instantáneas de las operaciones constructivas y medidas continuas en el tiempo. En estas últimas intervienen otros efectos. Entre ellos son los cambios de temperatura los que mayor incidencia tienen.

*De los resultados obtenidos de la medición continua se concluye:*

- Se observa que al realizar el proceso de clareado el forjado asume parte de las cargas a las cuales está sometido y así las transmite a los pilares de la estructura. Esta reducción se presentó en los diferentes forjados de la siguiente forma:
  - ✓ Una vez clareado el primer forjado, donde los puntales están apoyados en la losa de cimentación, el forjado asumió el 49% de la carga en relación a su peso propio, y los puntales asumieron el 51% de esta carga.
  - ✓ Al clarear el segundo forjado, donde los puntales están apoyados en el primer forjado, el forjado asumió el 28% de la carga en relación a su peso propio, y los puntales asumieron el 72% de esta carga.
  - ✓ Finalmente, al clarear el tercer forjado, donde los puntales están apoyados en el segundo forjado, el forjado asume el 36% de la carga en relación a su peso propio, y los puntales asumen el 64% de esta carga.

Las diferencias respecto a las medidas instantáneas de las operaciones constructivas ya comentadas estriban en que las distintas temperaturas al comenzar las distintas operaciones constructivas modifican las cargas iniciales, lo que impide discriminar con claridad el efecto de la operación de los cambios de temperatura entre otras variaciones en el tiempo.

- Una vez hormigonados forjados, estando cimbrados, la carga media por unidad de superficie de los puntales presentó variaciones en función de la temperatura ambiente. Esta variación se correspondió a aumento de carga en los puntales al descender la temperatura, y en descenso de carga en puntales al aumentar la temperatura. Las variaciones de carga en los puntales de cada de los forjados fue la siguiente:
  - ✓ Durante 3 días el forjado 1 se encontró cimbrado. El coeficiente de carga media en puntales osciló entre un máximo de 1.18 y un mínimo de 0.70, para una diferencia máxima de temperatura de 8°C. De esta forma se puede evaluar que para una diferencia de  $\pm 1^\circ\text{C}$  la carga por unidad de superficie en los puntales varió en  $\pm 0.34 \text{ kN/m}^2$ , lo que representa un 6% del peso propio del forjado.
  - ✓ El forjado 2 se mantuvo cimbrado durante 6 días. El coeficiente de carga media en puntales es este forjado llegó a un máximo de 1.47 y un mínimo de 0.92, para una diferencia máxima de temperatura de 14.38°C. Esto representa que para una diferencia de  $\pm 1^\circ\text{C}$  la carga media por unidad de superficie de los puntales varió  $0.21 \text{ kN/m}^2$ , lo que representa un 3.8% del peso propio del forjado.
  - ✓ El forjado 3 estuvo cimbrado durante 3 días. La variación del coeficiente de carga media en puntales alcanzó un máximo de 1.20 y un mínimo de 0.77, para una diferencia máxima de temperatura de 11.61°C. Así, para una diferencia de  $\pm 1^\circ\text{C}$  la

carga media por unidad de superficie de los puntales varió  $0.21 \text{ kN/m}^2$ , lo que representa un 3.8% del peso propio del forjado.

- Al clarear cada uno de los forjados, las variaciones de carga media por unidad de superficie en los puntales por temperatura mantiene la misma tendencia de incrementarse al descender la temperatura y reducirse frente a los descensos de temperatura. Las variaciones de carga en los puntales de cada uno de los forjados una vez clareados fue la siguiente:
  - ✓ La diferencia máxima entre los coeficientes de carga máximo y mínimo de los puntales del forjado 1 durante el tiempo en que éste se encontraba clareado fue de 0.26. Esta se corresponde a una diferencia de temperatura de  $14.38^\circ\text{C}$ . Lo que representa que para una diferencia de  $\pm 1^\circ\text{C}$  la carga media por unidad de superficie de los puntales varió  $0.10 \text{ kN/m}^2$ , es decir un 2% del peso propio del forjado.
  - ✓ Durante el tiempo en el que el forjado 2 se encontraba clareado, la diferencia máxima entre el coeficiente de carga máximo y mínimo de los puntales fue de 0.25. Correspondiente a una diferencia de temperatura de  $11.05^\circ\text{C}$ . Así, para una diferencia de  $\pm 1^\circ\text{C}$  la carga media por unidad de superficie de los puntales varió  $0.13 \text{ kN/m}^2$ , es decir un 2% del peso propio del forjado.
  - ✓ En el forjado 3 se presentó una diferencia máxima de 0.26 entre los coeficientes de carga máximo y mínimo de los puntales para una diferencia de temperatura de  $11.05^\circ\text{C}$ . Esto representa que para una diferencia de  $\pm 1^\circ\text{C}$  la carga media por unidad de superficie de los puntales varió  $0.13 \text{ kN/m}^2$ , es decir un 2% del peso propio del forjado.
- En la Tabla 4.3 se compara, para cada uno de los forjados, cual fue la variación del coeficiente de carga media en puntales y de la carga del puntal más cargado respecto a la variación máxima de temperatura para el periodo de tiempo entre dos operaciones constructivas consecutivas. Analizando dichas variaciones se puede concluir:
  - ✓ Durante las diferentes operaciones constructivas se midieron variaciones de carga en los puntales de los tres forjados. Estas variaciones oscilaron entre un 13 y 50% de la carga inicial que asumía cada puntal.
  - ✓ La variación de carga en los puntales, debido a la variación de temperatura, cobra una mayor importancia cuando el forjado está completamente cimbrado que cuando está clareado.
  - ✓ La relación  $\Delta C_p / \Delta T_{max}$  cuando los forjados están cimbrados, aumenta al aumentar la rigidez de la base de apoyo de los puntales: 0.064 para el forjado 1 (base de los puntales sobre la losa de cimentación); 0.048 para el forjado 2 (base de los puntales sobre el forjado 1 que a su vez apoya puntales sobre la losa de cimentación); 0.035 para el forjado 3 (base de los puntales sobre el forjado 2 que a su vez apoya puntales sobre el forjado 1).
  - ✓ Una vez clareados los tres forjados se reduce la relación  $\Delta C_p / \Delta T_{max}$ , o sea, se reduce la influencia de los cambios de temperatura en los incrementos de carga. Esta relación para los tres forjados una vez clareados y hasta su descimbrado tiene un valor medio de 0.021 con una desviación típica de 0.004.

Tabla 4.3 Variación de carga respecto a la variación máxima de temperatura entre dos operaciones constructivas en los puntales de los forjados 1, 2 y 3

Operación	Forjado 1					Forjado 2					Forjado 3				
	$\Delta T_{max}$ (°C)	$\Delta C_p$	$\frac{\Delta C_p}{\Delta T_{max}}$	$\Delta P$ (kN)	$\frac{\Delta P}{\Delta T_{max}}$	$\Delta T_{max}$ (°C)	$\Delta C_p$	$\frac{\Delta C_p}{\Delta T_{max}}$	$\Delta P$ (kN)	$\frac{\Delta P}{\Delta T_{max}}$	$\Delta T_{max}$ (°C)	$\Delta C_p$	$\frac{\Delta C_p}{\Delta T_{max}}$	$\Delta P$ (kN)	$\frac{\Delta P}{\Delta T_{max}}$
1	Hormigonado														
	Forjado 1														
	Entre 1 y 2	0.48	0.064	3.00	0.400										
2	Clareado														
	forjado 1														
	Entre 2 y 3	0.15	0.012	2.40	0.189										
3	Hormigonado														
	Forjado 2														
	Entre 3 y 4	0.23	0.021	3.80	0.345	11.00	0.53	0.048	1.90	0.173					
	Clareado														
	Forjado 2														
	Entre 4 y 5	0.15	0.020	2.50	0.333	7.50	0.22	0.029	3.00	0.400					
5	Descimbrado														
	Forjado 1														
	Entre 5 y 6					7.50	0.20	0.026	2.50	0.333					
6	Hormigonado														
	Forjado 3														
	Entre 6 y 7					11.30	0.22	0.020	2.80	0.248	11.30	0.40	0.035	3.50	0.310
	Clareado														
	Forjado 3														
	Entre 7 y 8					8.50	0.20	0.023	2.00	0.235	8.50	0.17	0.020	4.30	0.505
8	Carga														
	Forjado 3														
	Entre 8 y 9					5.80	0.10	0.017	1.50	0.256	5.80	0.13	0.022	1.00	0.172
9	Descimbrado														
	Forjado 2														

- ✓ La relación  $\Delta P_{max,p+}/\Delta T_{max}$  muestra considerables diferencias en cada uno de los forjados para las diferentes operaciones constructivas. Esto es debido a que se depende exclusivamente de un solo puntal (el puntal que presenta la carga máxima), con lo cual algunos efectos como el nivel de apriete del puntal hacen errática la consideración de esta relación.

## **CAPITULO 5. ESTUDIO POR EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS**

### **5.1. Introducción**

El efecto que tiene el clareado sobre la transmisión de cargas entre forjados y puntales en la construcción de edificios de plantas consecutivas, solo ha sido estudiado hasta la fecha por Moragues et al (1992, 1994) (véanse apartados 2.3.1.7 y 2.3.2.3). Moragues et al (1996), a partir de la recopilación de datos experimentales en obras reales, desarrollaron y validaron un modelo en dos dimensiones por el Método de los Elementos Finitos (en adelante MEF). En la investigación desarrollada por Moragues et al. (1992, 1994), se evidenció que al realizar la operación de clareado de un forjado, parte de la carga es asumida por éste, propiciando una descarga global del conjunto de puntales.

La conclusión de Moragues et al. (1992, 1994), es reforzada por los resultados experimentales de la presente Tesis Doctoral. En el Capítulo 4 se evidencia que al realizar la operación del clareado, en el modelo experimental construido, los forjados llegan a asumir en torno al 50% de carga en relación a su peso propio

A partir de los resultados experimentales, y partiendo de las características geométricas y mecánicas de cada uno de los elementos que intervienen en la construcción del edificio, en el presente capítulo se lleva a cabo el desarrollo y validación de un modelo tridimensional por el MEF. El desarrollo del modelo de EF pretende simular la transmisión de cargas entre puntales y forjados, en un proceso de cimbrado, clareado y descimbrado. En este modelo no se han considerado los efectos de los cambios de temperatura aunque si la variación de las propiedades del hormigón. De esta forma, la validación se realiza con las medidas instantáneas de las operaciones constructivas.

Para el desarrollo del estudio por el MEF se emplean hipótesis que serán tratadas con detalle en los apartados posteriores. Es de destacar que la hipótesis más importante se basa en simular a los puntales como elementos elásticos con una rigidez finita. Esta hipótesis es básica para simular la reducción de rigidez del sistema de cimbrado que se origina al retirar el 50% de los puntales dentro del proceso de clareado.

Para realizar el cálculo evolutivo que implica el proceso constructivo del edificio, se ha empleado la opción “Birth and Death” y el comando MPCHG disponibles en ANSYS 11.0 (2007). Los aspectos más relevantes del funcionamiento de ANSYS 11.0 (2007) se detallan en apartados posteriores.

Una vez verificado el modelo de EF, se desarrolla un estudio comparativo entre los diferentes procesos de cimbrado, comparando las posibles ventajas y desventajas que un proceso de “cimbrado, clareado y

descimbrado” (en adelante CCD) tiene frente a los procesos de “cimbrado y descimbrado” (en adelante CD), y de “cimbrado, recimbrado y descimbrado” (en adelante CRD).

## 5.2. Hipótesis del modelo de EF

El modelo de EF descrito en este Capítulo pretende simular el estudio experimental. Así, las características geométricas de los elementos que forman el modelo son las que se describen en el Capítulo 3 (véase apartado 3.2 y los planos del Apéndice I). De la misma forma, el proceso constructivo se ha modelizado según el proceso descrito en el mismo Capítulo (véase apartado 3.4).

Definidas las características y el proceso constructivo del edificio a modelar se adoptaran las siguientes hipótesis:

- ✓ Se asume un comportamiento elástico y lineal del forjado de hormigón armado, considerando la variación de su rigidez con respecto al tiempo. Para evaluar la evolución del módulo de elasticidad del hormigón de los forjados en el tiempo, se usa la técnica de la madurez. Esta técnica permite, mediante la medida de la temperatura del hormigón y el tiempo, evaluar la evolución de cualquier parámetro en tiempo real y para un historial de temperaturas. En el Apéndice V se muestra el proceso de cálculo para estimar la evolución diaria del módulo de elasticidad del hormigón de cada uno de los forjados.
- ✓ Los pilares son considerados como elementos de sección rectangular. Se asume que éstos tienen un comportamiento elástico y lineal, y se considera la variación de su rigidez con respecto al tiempo.
- ✓ Los puntales de acero son considerados como soportes elásticos con una rigidez finita, apoyados en sus extremos. Sus características principales se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Características geométricas y mecánicas de los puntales considerados en el modelo

Longitud (m)	Diámetro del cuerpo (mm)	Espesor cuerpo (mm)	Módulo de elasticidad (GPa)
2.88	48	2	210

El valor del módulo de elasticidad ha sido verificado en el apartado 3.7.1 de la presente Tesis Doctoral.

- ✓ Los tableros de encofrado son considerados como elementos con un comportamiento elástico y lineal y de rigidez finita. Dichos tableros son de madera y sus propiedades son las proporcionadas por la casa de encofrados ALSINA. Se muestran en la Tabla 5.2 las características del encofrado empleadas en el desarrollo del modelo de EF.

Tabla 5.2 Características geométricas y mecánicas de los tableros de encofrado considerados en el modelo

Espesor (mm)	Módulo de elasticidad (GPa)
27	10

- ✓ Las sopandas de acero son simuladas como elementos con un comportamiento elástico y lineal, con una rigidez finita. Las características de las sopandas se muestran en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Características geométricas y mecánicas de las sopandas consideradas en el modelo

Sección transversal (mm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad (GPa)
406	210

- ✓ La cimentación se considera infinitamente rígida. Esta hipótesis se adopta a partir de establecer que el conjunto de puntales del forjado 1 apoyan directamente sobre la losa de cimentación.
- ✓ No se consideran los efectos de los cambios de temperatura en los diferentes elementos de la estructura, sobre la transmisión de cargas entre forjados y puntales.
- ✓ Los efectos de fluencia y retracción son despreciados.

### 5.3. Descripción del modelo de EF

El modelo de EF se realizó con el software comercial ANSYS 11 (2007). Para la discretización de cada una de las partes de la estructura se utilizaron EF tipo SHELL, BEAM y LINK. En los apartados siguientes se explica el tipo y el uso de cada uno de estos elementos. De igual forma se describe como se simula el proceso de cálculo evolutivo del edificio.

#### 5.3.1. Tipos de EF y mallado empleado

Los forjados de hormigón y los tableros de encofrado de madera se modelizan mediante elementos bidimensionales SHELL63 (ANSYS, 2007). Este elemento está formado por 4 nodos, con 6 grados de libertad por nodo (traslaciones y giros en X, Y, Z) y un espesor “h”. El elemento SHELL63 admite realizar un cálculo evolutivo mediante el uso de la opción Birth and Death y el comando MPCHG, que permiten considerar la aparición de nuevos elementos en el cálculo y variar las propiedades de los materiales en el tiempo. Estas opciones se explicaran con detalle en apartados posteriores (véase apartado 5.3.2). La figura 5.1 incluye la geometría y localización de los nodos del elemento.

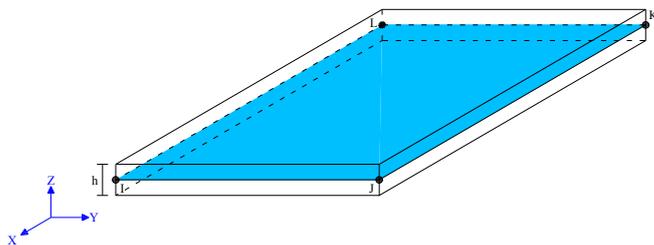


Fig. 5.1 Elemento SHELL63 (ANSYS 11.0 2007)

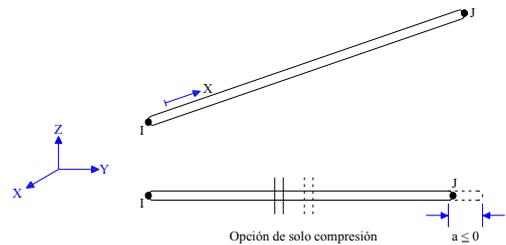


Fig. 5.2 Elemento LINK10 (ANSYS 11.0 2007)

El tamaño de la malla de los forjados está condicionado por sus dimensiones y por la distribución espacial de los componentes del sistema de cimbrado y encofrado. Así, buscando simular con un alto grado de aproximación las características de la estructura, el tamaño de malla de EF para el forjado es de 0.20x0.20 m<sup>2</sup>. En el caso de los elementos del encofrado, al tener que coincidir sus nodos con los nodos de los elementos del forjado, el tamaño de la malla de EF también es de 0.20x0.20 m<sup>2</sup>.

Los puntales metálicos se modelizan mediante elementos unidimensionales de 2 nodos tipo LINK10 con 3 grados de libertad por nodo (traslaciones en X, Y, Z). Dentro de sus opciones, se permite considerar que sólo estará sometido a esfuerzos de compresión, siendo ideal para modelar los puntales. El elemento LINK10 también permite el empleo de la opción Birth and Death que posibilita, para el caso de los puntales, modelar las operaciones de cimbrado, clareado y descimbrado. La figura 5.2 muestra la geometría y disposición de los nodos del elemento.

Para modelizar los pilares de hormigón y las sopandas de acero se emplean elementos tipo BEAM44. El elemento BEAM44 tiene dos nodos (I, J) y un tercer nodo opcional (K) que define la orientación del elemento (en el presente análisis se prescindió de emplear dicho nodo). Este elemento cuenta con 6 grados de libertad por nodo (traslaciones y giros en X, Y, Z). Dicho elemento permite desplazar sus nodos a partir del eje de la sección (ideal para desplazar los nodos al punto de crecimiento de cada uno de los pilares). Al igual que el resto de elementos empleados en el modelo de EF, el elemento BEAM44 admite la opción Birth and Death y el comando MPCHG. En la figura 5.3 se observa la geometría y disposición de los nodos de dicho elemento.

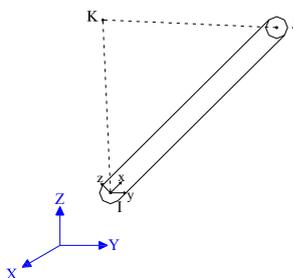


Fig. 5.3 Elemento BEAM44 (ANSYS 11.0 2007)

El tamaño de la malla de los pilares de hormigón es de 0.58 m. En el caso de las sopandas, siendo necesario que los nodos coincidieran con los nodos del encofrado, el tamaño de la malla es de 0.20 m.

### 5.3.2. Desarrollo del modelo

El modelo a desarrollar consiste en una estructura de carácter evolutivo. Más concretamente, se trata de una estructura en donde las condiciones de apoyo (puntales, sopandas y encofrado), y las características de los materiales (hormigón), son cambiantes con el tiempo.

Viendo la necesidad de realizar éste cálculo evolutivo, se planteó la necesidad de utilizar un programa de EF que permitiera considerar dicha particularidad. El programa escogido (ANSYS 11.0 (2007)) permite realizar el mencionado cálculo.

El cálculo evolutivo en ANSYS 11.0 (2007) se hace en diferentes pasos de carga (Loads Steps). Un paso de carga consiste en calcular la estructura con la geometría y las propiedades de los materiales correspondientes a cada una de las fases constructivas consideradas. Así, una vez resuelto el primer paso de carga, el cálculo de un segundo paso parte de los valores de deformación y esfuerzos obtenidos en el primero. De esta forma, se consigue realizar un cálculo evolutivo considerando tantos pasos de carga como fases de construcción del edificio. Para conseguir esto, ANSYS 11.0 (2007) dispone de las opciones Birth and Death y el comando MPCHG.

La opción Birth and Death consiste en activar o desactivar elementos de la estructura a calcular. Para desactivar elementos de la estructura en un paso de carga, se utiliza el comando EKILL. Este comando reduce el valor de rigidez del elemento considerado, multiplicándola por un factor de  $1.0E-6$  (valor por defecto que se puede modificar). Igualmente, al desactivar un elemento, las cargas asociadas a éste son nulas. Para activar un elemento se emplea el comando EALIVE. Este comando asigna a los elementos considerados su rigidez correspondiente, y recupera los valores de carga asociados a dichos elementos.

La evolución del módulo de elasticidad del hormigón en el tiempo se realiza utilizando el comando MPCHG. Este comando permite cambiar el material asignado a los elementos seleccionados. De esta forma, en la construcción del modelo de EF se crean materiales módulos de elasticidad correspondientes a la edad del hormigón de cada uno de los forjados, en cada una de las fases de construcción. Posteriormente, en cada uno de los pasos de carga, el módulo de elasticidad de los elementos de los forjados se cambia dependiendo de la edad del hormigón para la fase constructiva considerada. La evolución del módulo de elasticidad del hormigón de los forjados se estima a partir del ensayo en laboratorio de probetas normalizadas y empleando la técnica de la madurez (el Apéndice V muestra el proceso de cálculo del módulo de elasticidad).

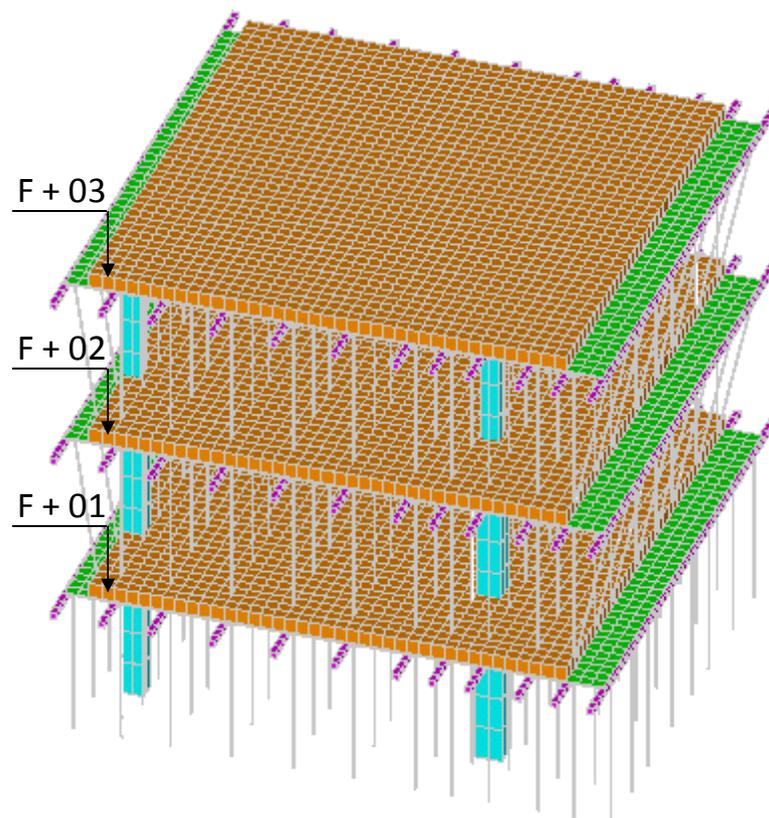


Fig. 5.4 Vista tridimensional del modelo de EF

El proceso de modelado de la estructura está compuesto por tres fases. La primera fase o pre-proceso consiste en definir el tipo de EF, las características de los materiales, la geometría y mallado de la estructura, y la aplicación de cargas en los elementos. En esta fase se define completamente el modelo

de EF, definiendo los tres forjados, pilares y la estructura provisional de encofrado. La figura 5.4 muestra la estructura modelada una vez terminado el pre-proceso.

La segunda fase, consiste en resolver 9 pasos de carga correspondientes con 9 fases constructivas. A continuación se explican cada uno de los pasos de carga del modelo de EF:

- a. Paso de carga (Hormigonado del forjado 1). El cálculo de este paso de carga consiste en desactivar los elementos de los forjados superiores, incluida su estructura temporal (puntales, sopandas y encofrado), dejando solo activados los elementos del forjado 1 con su sistema de cimbrado. La figura 5.5 muestra una vista tridimensional del modelo de EF y las propiedades de los materiales considerados para cada elemento.

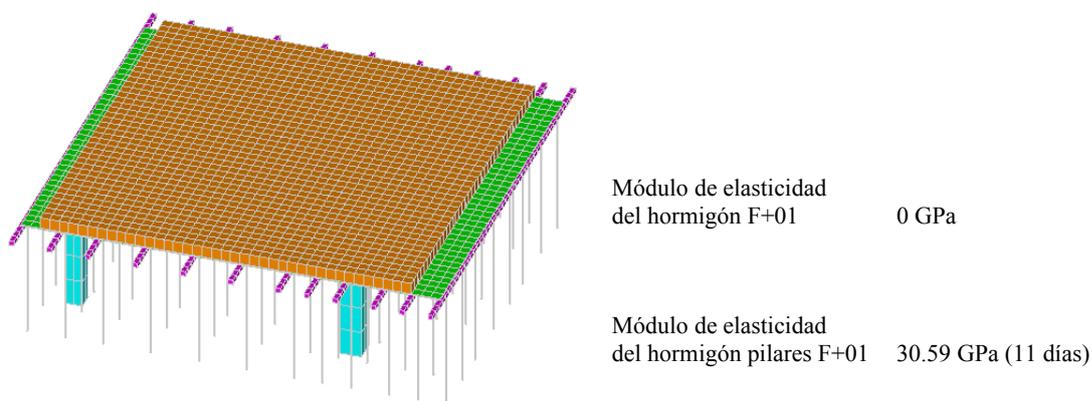


Fig. 5.5 Hormigonado del forjado 1

- b. Paso de carga 2 (Clareado del forjado 1). Para el cálculo de éste paso de carga se desactivan los elementos del encofrado y las sopandas intermedias con sus correspondientes puntales. El módulo de elasticidad del hormigón de los forjados y pilares es modificado por el que corresponde, según la edad del hormigón, al instante de realizar dicha operación de clareado.

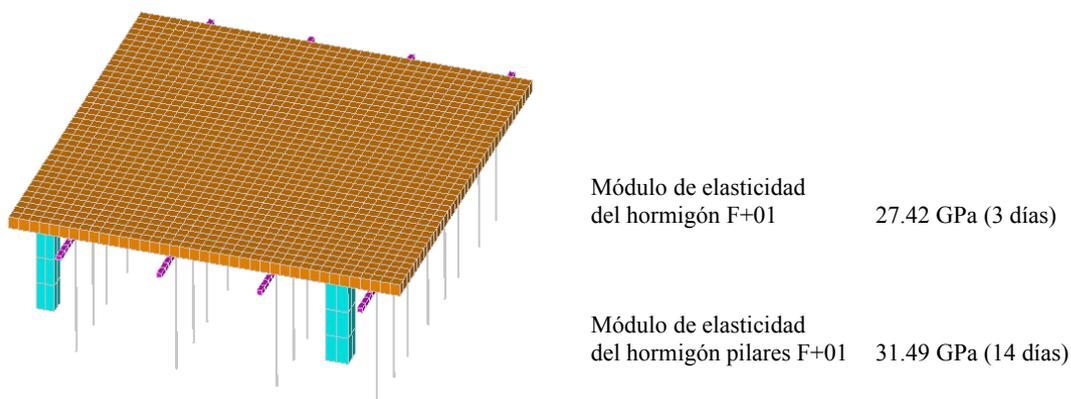


Fig. 5.6 Clareado del forjado 1

La figura 5.6 muestra una vista en tres dimensiones del modelo de EF y las propiedades de los elementos de hormigón.

- c. Paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2). En éste paso de carga se activan el conjunto de elementos del forjado 2 incluidos pilares, encofrado, sopandas y puntales. Los módulos de

elasticidad de los pilares y del forjado 1 se modifican según la edad de dichos elementos en el instante de realizar el hormigonado del forjado 2. La figura 5.7 muestra una vista tridimensional del modelo de EF y las propiedades de los materiales considerados para cada elemento.

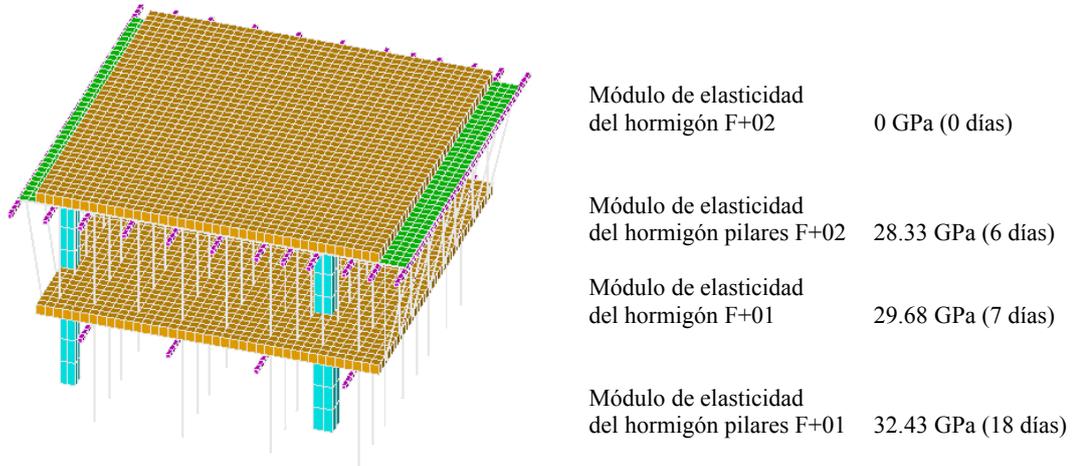


Fig. 5.7 Hormigonado del forjado 2

- d. Paso de carga 4 (Clareado del forjado 2). El cálculo del paso de carga 4 consiste en evaluar el comportamiento de la estructura teniendo los forjados 1 y 2 clareados. Para éste cálculo se desactivan el encofrado y sopandas intermedias con sus correspondientes puntales del sistema de cimbrado del forjado 2. La Figura 5.8 muestra el modelo de EF y los módulos de elasticidad de los elementos de hormigón según su edad.

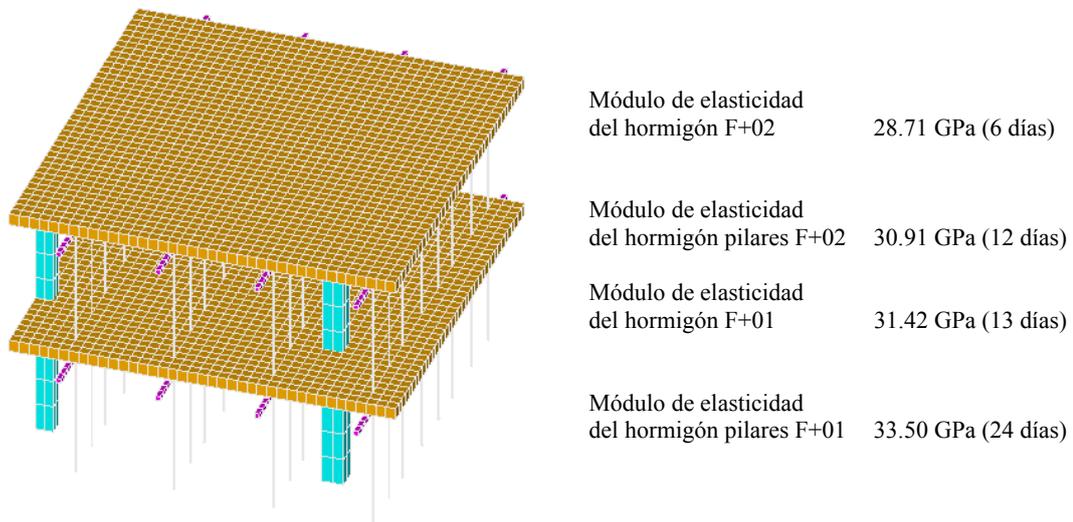
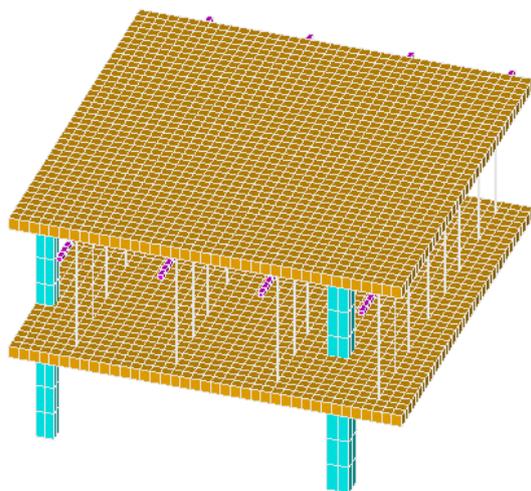


Fig. 5.8 Clareado del forjado 2

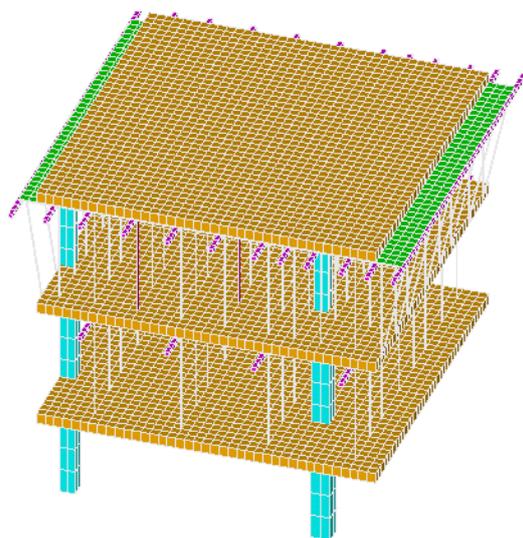
- e. Paso de carga 5 (Descimbrado del forjado 3). En este paso de carga se desactivan los puntales y sopandas bajo el forjado 1, quedando tan solo los puntales y sopandas bajo el forjado 2. Las propiedades de los elementos de hormigón se evolucionan de acuerdo a su edad. En la Figura 5.9 se observa el modelo de EF que se corresponde al descimbrado del forjado 1.



Módulo de elasticidad del hormigón F+02	29.06 GPa (7 días)
Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+02	31.21 GPa (13 días)
Módulo de elasticidad del hormigón F+01	31.59 GPa (14 días)
Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+01	33.65 GPa (25 días)

Fig. 5.9 Descimbrado del forjado 1

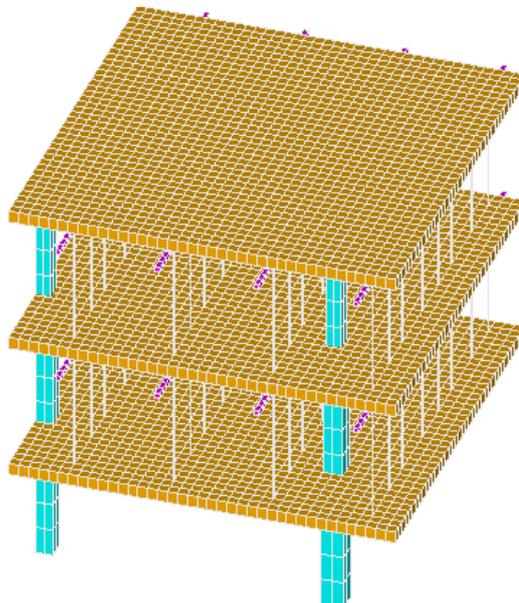
- f. Paso de carga 6 (Hormigonado del forjado 3). Partiendo del modelo de EF del paso de carga 5, en el modelo del paso de carga 6 se activan los elementos del forjado 3 incluyendo sus pilares y su sistema de cimbrado (encofrado, sopandas y puntales). De la misma forma que en los pasos de carga anteriores, los módulos de elasticidad de los elementos de hormigón se evolucionan para la edad de cada uno de estos en el momento de hormigonado del forjado 3. La Figura 5.10 muestra el modelo de EF considerado en este paso de carga.



Módulo de elasticidad del hormigón F+03	0 GPa (0 días)
Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+03	26.82 GPa (4 días)
Módulo de elasticidad del hormigón F+02	30.01 GPa (10 días)
Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+02	31.99 GPa (16 días)
Módulo de elasticidad del hormigón F+01	32.10 GPa (17 días)
Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+01	34.08 GPa (28 días)

Fig. 5.10 Hormigonado del forjado 3

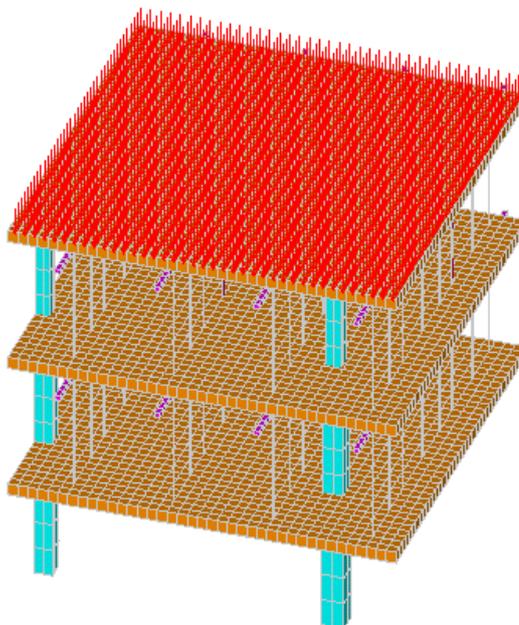
- g. Paso de carga 7 (Clareado del forjado 3). Para el cálculo de éste paso de carga se desactivan el encofrado, puntales y sopandas intermedias, simulando de ésta forma el clareado del tercer forjado. La Figura 5.11 muestra el modelo de EF y los módulos de elasticidad de los elementos de hormigón para el momento del clareado del forjado 3.



Módulo de elasticidad del hormigón F+03	26.96 GPa (3 días)
Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+03	28.90 GPa (7 días)
Módulo de elasticidad del hormigón F+02	30.85 GPa (13 días)
Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+02	32.63 GPa (19 días)
Módulo de elasticidad del hormigón F+01	32.58 GPa (20 días)
Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+01	34.08 GPa (28 días)

Fig. 5.11 Clareado del forjado 3

- h. Paso de carga 8 (Carga en el forjado 3). En el modelo experimental se aplicó en el forjado 3 una carga uniforme mediante balsas de agua. Para simular éste proceso en el modelo de EF, se aplica una carga uniforme en los elementos del forjado 3. La figura 5.12 muestra el modelo de elementos correspondiente al paso de carga 8, y los valores de módulo de elasticidad de los diferentes elementos de hormigón.



Módulo de elasticidad del hormigón F+03	28.70 GPa (7 días)
Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+03	30.63 GPa (11 días)
Módulo de elasticidad del hormigón F+02	31.58 GPa (17 días)
Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+02	33.40 GPa (23 días)
Módulo de elasticidad del hormigón F+01	33.06 GPa (24 días)
Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+01	34.14 GPa (28 días)

Fig. 5.12 Clareado del forjado 3

- i. Paso de carga 9 (Descimbrado del forjado 2). El último paso de carga consiste en el descimbrado del forjado 2. Para simular éste proceso se desactivan los elementos de puntales y sopandas bajo el

forjado 2. En la Figura 5.13 se observa el modelo de EF y los módulos de elasticidad de los elementos de hormigón para el paso de carga 9.

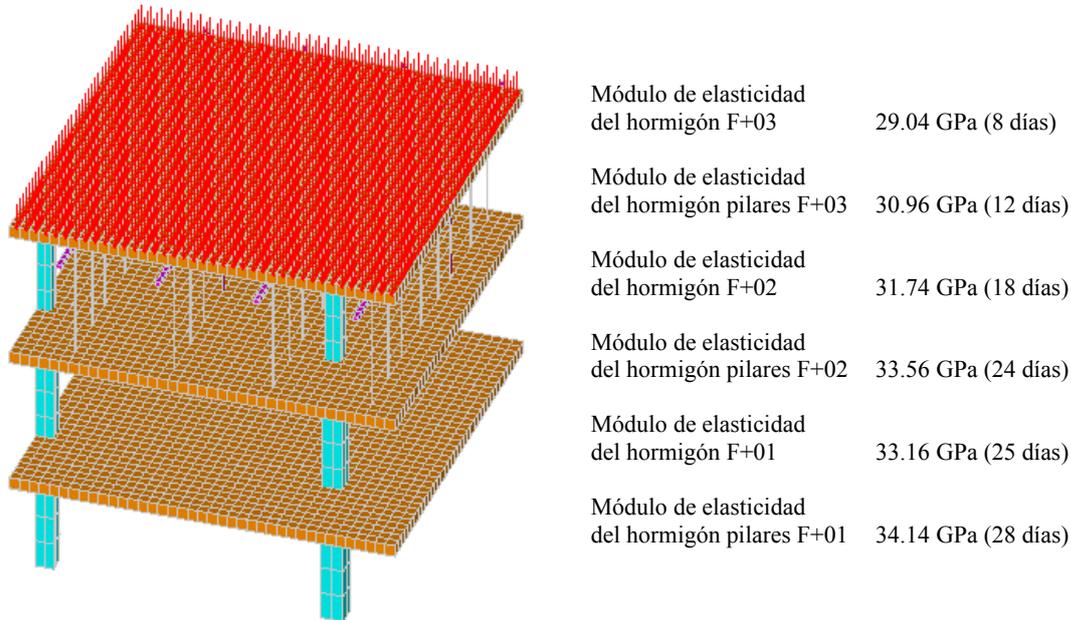


Fig. 5.13 Clareado del forjado 3

Tal y como se ha indicado con anterioridad, la modelación de la estructura está compuesta por 3 fases. Mientras que las dos primeras fases han sido expuestas con anterioridad, cabe mencionar que la tercera fase o post-proceso, consiste en extraer los resultados de cada uno de los pasos de carga considerados. Así, en el apartado 5.4 se analizan los resultados obtenidos del modelo de EF, validándolos con las mediciones del modelo experimental.

#### 5.4. Verificación y análisis del modelo de EF

Para el cálculo del modelo de EF se utilizó un ordenador con las siguientes características:

- ✓ Procesador Intel Pentium 4 a 3.20 GHz.
- ✓ Memoria RAM de 2 Giga Bytes.
- ✓ Disco duro de 120 Giga Bytes.

El tiempo de cálculo del modelo de EF, incluyendo todos los pasos de carga, fue de 44 minutos.

A continuación se analizan y verifican los resultados del modelo de EF, para cada uno de los pasos de carga correspondientes a cada una de las fases de construcción. La verificación del modelo de EF se realiza a partir de las medidas instantáneas obtenidas en el desarrollo del estudio experimental.

### 5.4.1. Paso de carga 1 (Hormigonado del forjado 1)

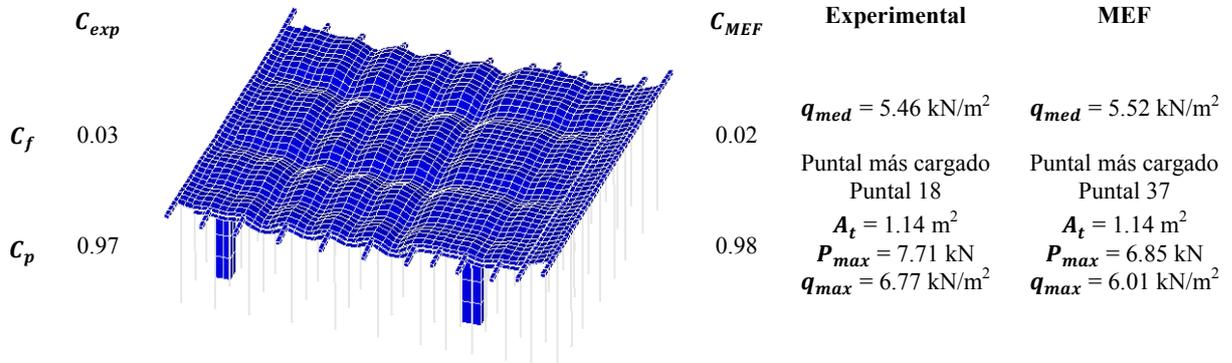


Fig. 5.14 Resultados del modelo numérico. Paso de carga 1 (Hormigonado del forjado 1)

La Figura 5.14 muestra los resultados obtenidos del modelo de EF comparados con las mediciones del estudio experimental. En este paso de carga la totalidad del peso del forjado es asumido por el conjunto de puntales. Ahora bien, la relación entre las cargas medias experimental y numérica ( $q_{med,exp}/q_{med,MEF}$ ) es de 0.99, lo que muestra un alto grado de ajuste entre los resultados del modelo de EF y las mediciones experimentales

La posición de la carga máxima cambia considerablemente. Sin embargo como es esperable, ambas posiciones corresponden a puntales con área tributaria máxima. La relación entre cargas máximas ( $P_{max,exp}/P_{max,MEF}$ ) es de 1.13.

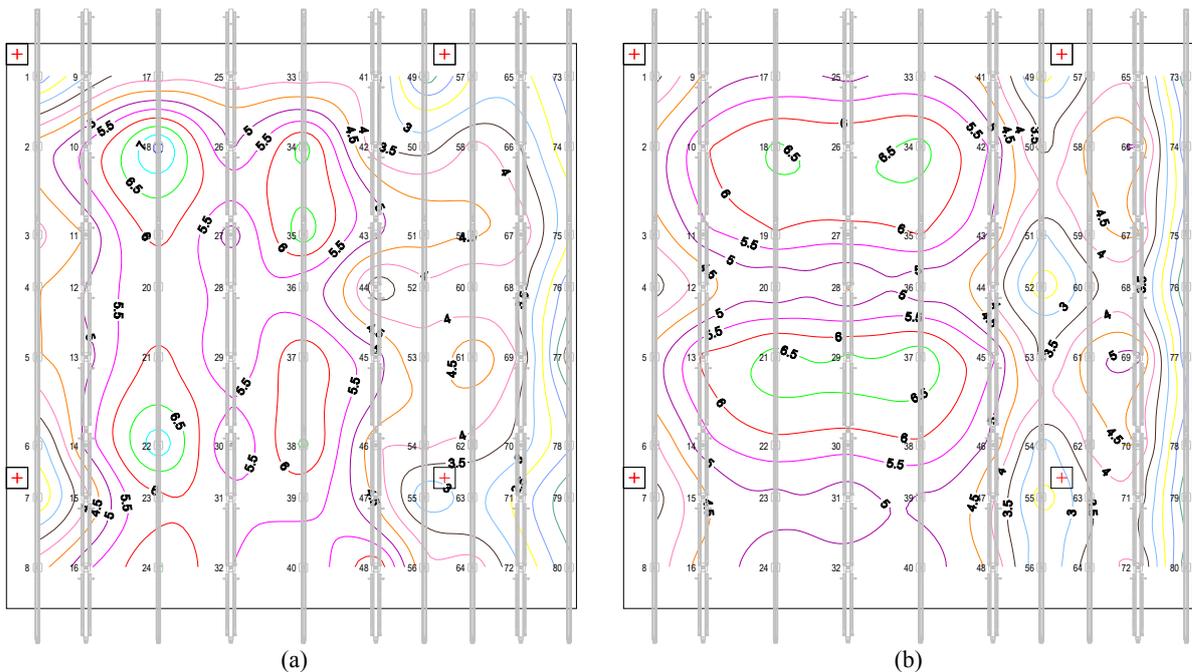


Fig. 5.15 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. Hormigonado del forjado 1. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)

La Figura 5.15 muestra la distribución de cargas en los puntales bajo el forjado 1 para el modelo experimental y para el modelo de EF. Resulta muy difícil en el estudio experimental garantizar que los

puntales se encuentran todos apretados de la misma forma. Es por esto que los valores de carga por puntal varían considerablemente comparando el estudio experimental con el modelo de EF. Sin embargo, es claro que la tendencia de cómo se reparten las cargas en los puntales es muy similar en ambos modelos, siendo los valores de carga por puntal muy similares.

### 5.4.2. Paso de carga 2 (Clareado del forjado 1)

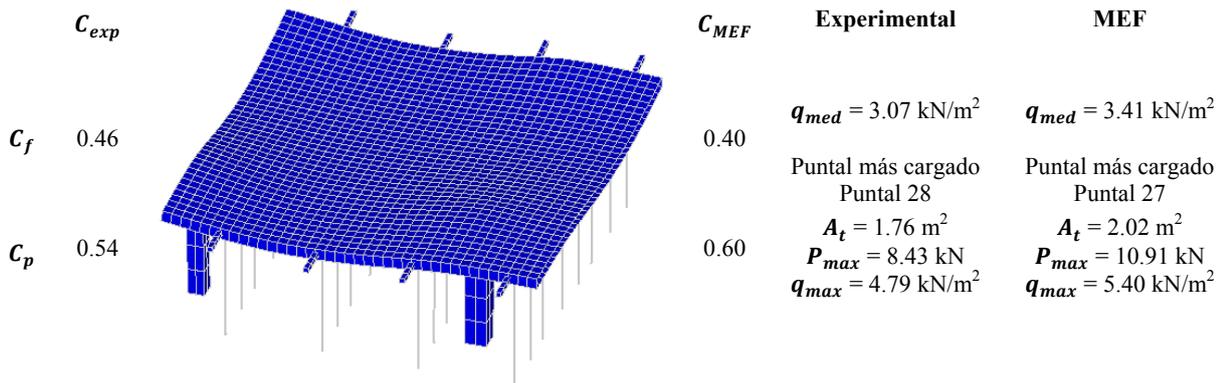


Fig. 5.16 Resultados del modelo numérico. Paso de carga 2 (Clareado del forjado 1)

En el paso de carga 2 se simuló el clareado del forjado 1 (véase Fig. 5.16). Al realizar la operación de clareado, el forjado asume una fracción importante de carga tanto en las medidas experimentales como en los resultados del modelo de EF.

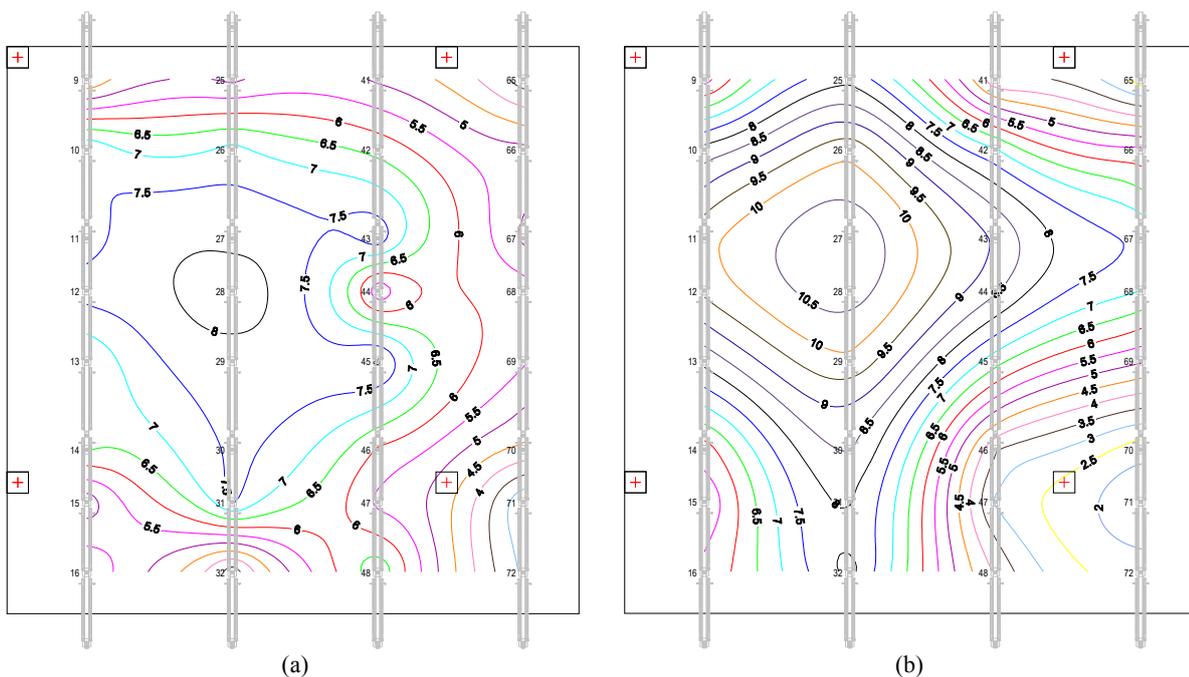


Fig. 5.17 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. Clareado del forjado 1. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)

Al igual que en el paso de carga 1, existe en el paso de carga 2 un alto grado de ajuste entre los valores experimentales y numéricos. Siendo la relación  $q_{med,exp}/q_{med,MEF}$  igual a 0.90. Sin embargo existe

una diferencia ligeramente superior en los valores de carga en los puntales, siendo la relación  $P_{max,exp}/P_{max,MEF}$  igual a 0.77.

La figura 5.17 muestra la distribución de cargas en los puntales del forjado 1 comparando las medidas experimentales con las obtenidas en el modelo de EF. En ésta figura se aprecia que existe una mayor diferencia entre los valores de carga de cada uno de los puntales. Sin embargo, la distribución de dichas cargas tiene una tendencia muy similar, siendo claramente alterada por el puntal 44, que probablemente estaba menos apretado que los puntales 43 y 45, lo que provocó que éstos asumiesen un poco más de carga (este efecto parece confirmarse también en la Figura 5.15).

### 5.4.3. Paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2)

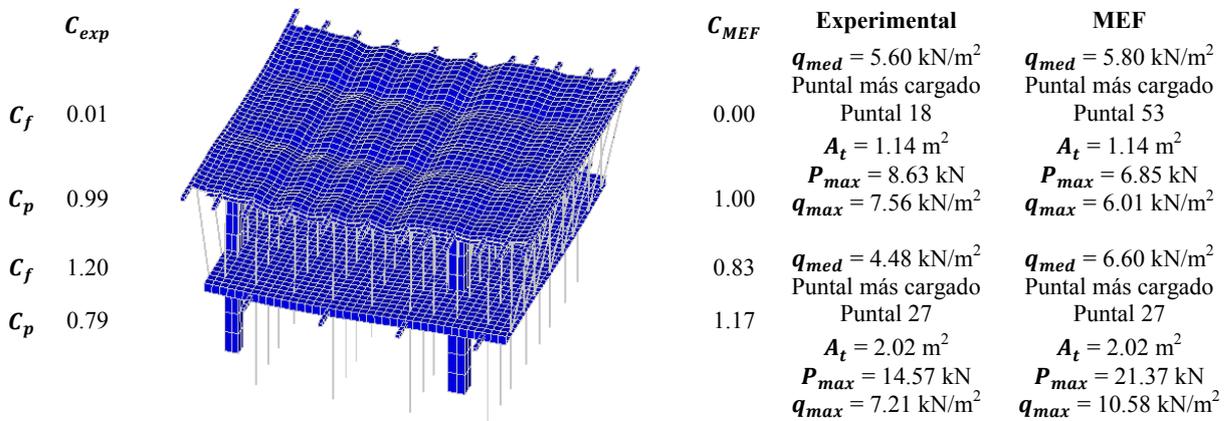


Fig. 5.18 Resultados del modelo numérico. Paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2)

La figura 5.18 muestra los resultados del paso de carga 3 comparados con las medidas experimentales tomadas una vez hormigonado el forjado 2. El grado de ajuste entre las medidas experimentales y los resultados numéricos de las cargas en los puntales bajo dicho forjado es muy alto ( $q_{med,exp}/q_{med,MEF} = 0.97$ ). Sin embargo, en lo referente a la carga de los puntales del forjado 1 se tiene un error del 32% entre las medidas experimentales y los resultados numéricos ( $q_{med,exp}/q_{med,MEF} = 0.68$ ). Esto último está motivado por un fallo al extraer los basculantes de las sopandas principales al clarear el forjado 1 (véase apartado 4.3.2).

La relación de cargas máximas ( $P_{max,exp}/P_{max,MEF}$ ) es de 0.69 para los puntales del forjado 1 y de 1.26 para los puntales del forjado 2. En las figuras 5.19 y 5.20 se muestra una comparación entre la distribución de cargas medidas experimentalmente y las cargas obtenidas en el modelo numérico, para los puntales bajo los forjados 1 y 2 respectivamente. En estas figuras se observa que la ubicación de la carga máxima en los puntales del forjado 2 no coincide. A diferencia de la carga máxima en los puntales del forjado 1, donde el puntal 27 es el más cargado según las medidas experimentales y los resultados del modelo de EF.

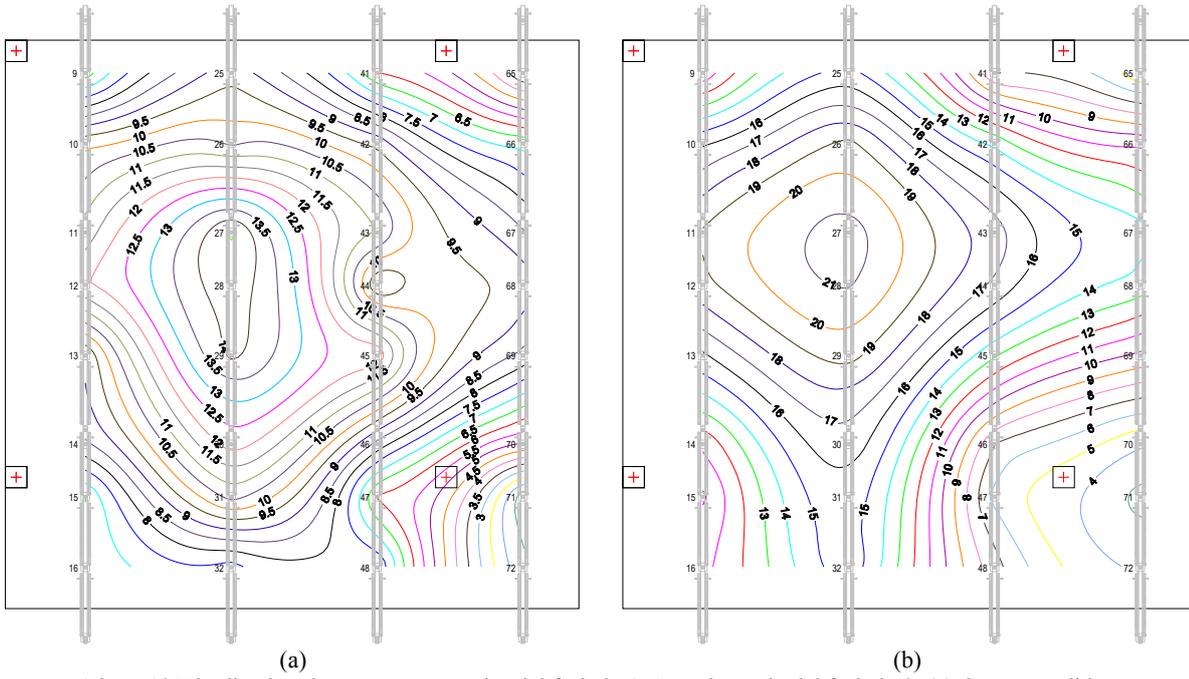


Fig. 5.19 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. Hormigonado del forjado 2. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)

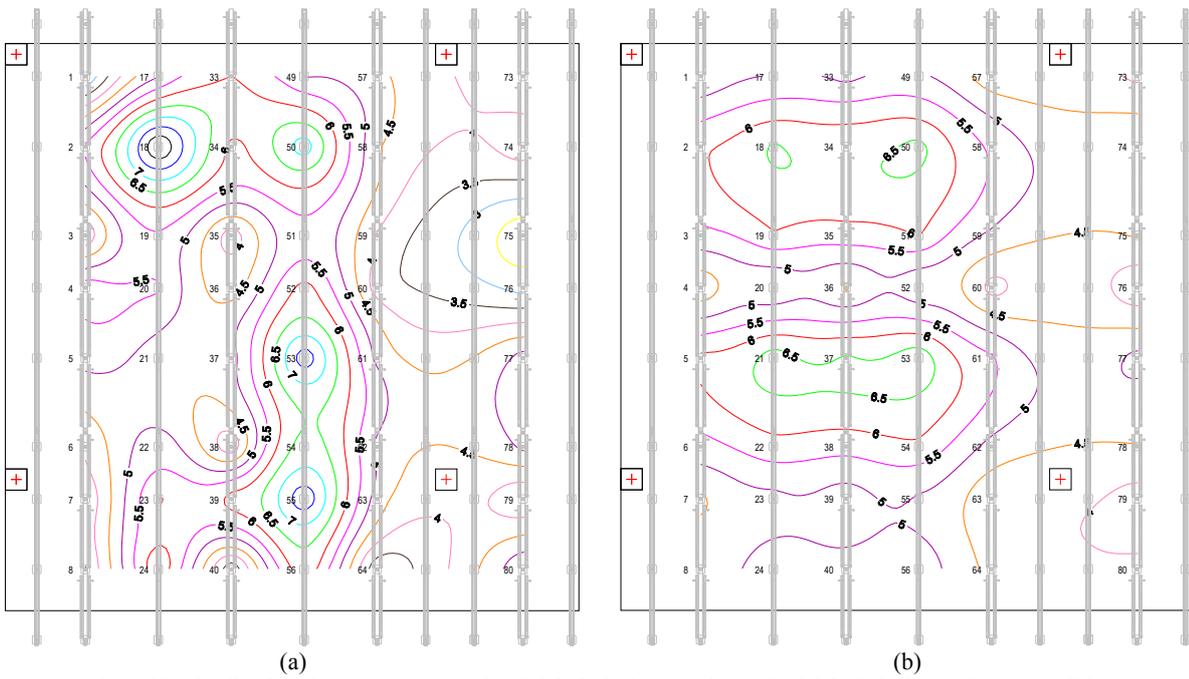


Fig. 5.20 Distribución de cargas en puntales del forjado 2. Hormigonado del forjado 2. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)

5.4.4. Paso de carga 4 (Clareado del forjado 2)

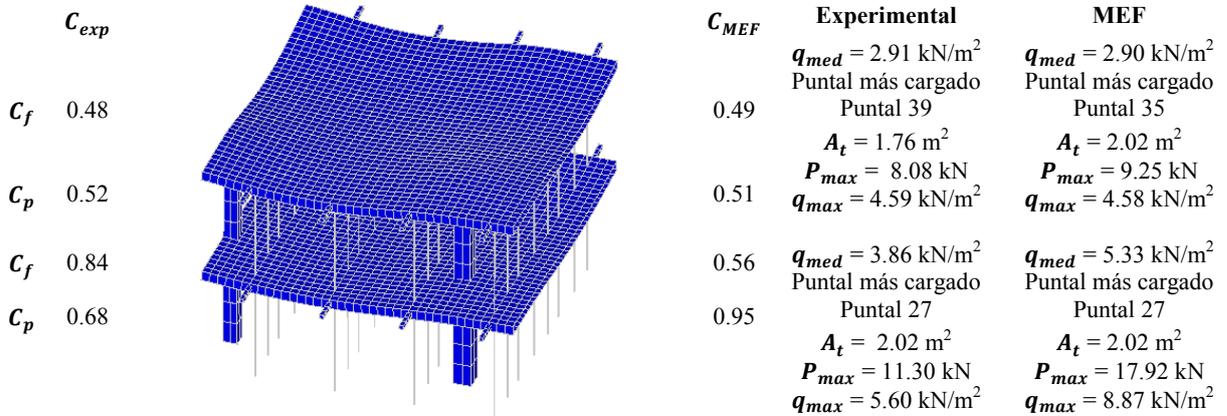


Fig. 5.21 Resultados del modelo numérico. Paso de carga 4 (Clareado del forjado 2)

En la Figura 5.21 se muestran los resultados del paso de carga 4 correspondientes al clareado del forjado 2. En esta figura se observa que para los puntales del forjado 2 el ajuste entre las medidas experimentales y los resultados del modelo numérico es excelente ( $q_{med,exp}/q_{med,MEF} = 1.00$ ). En el caso de los puntales del forjado 1 el ajuste es menor detectándose un error del 27%.

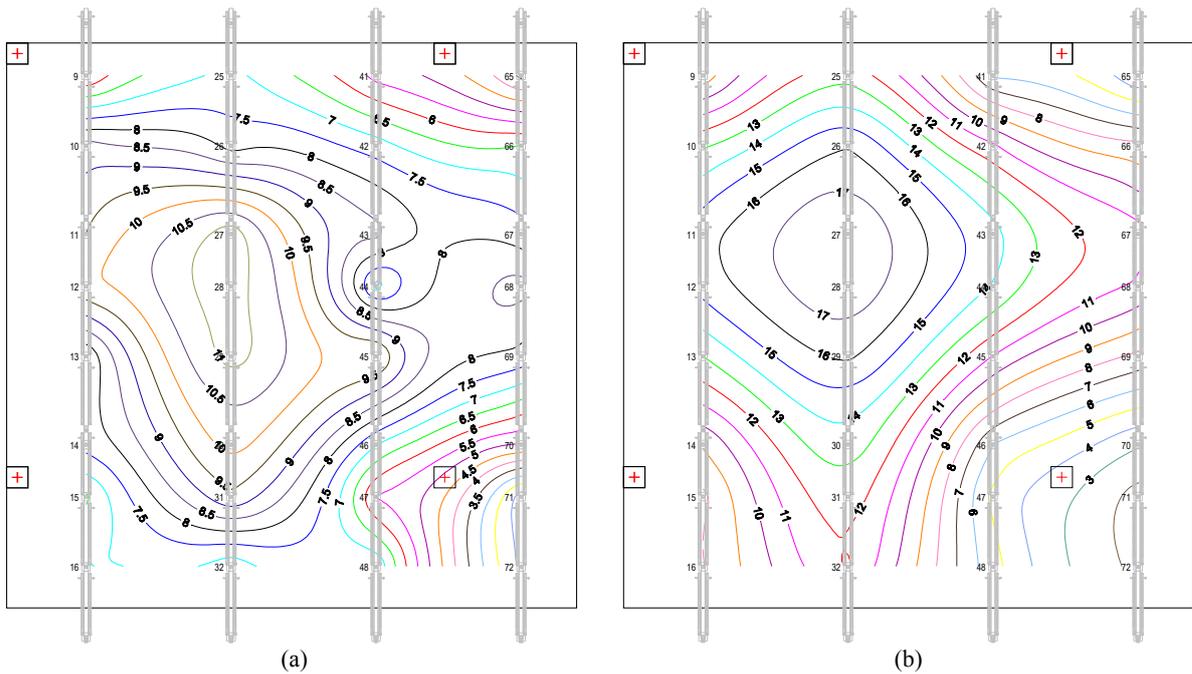


Fig. 5.22 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. Clareado del forjado 2. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)

En la figura 5.22 se comparan las distribuciones de carga, para los puntales del forjado 1, entre el modelo experimental y el modelo de EF. El error entre la carga máxima medida en el modelo experimental y la obtenida en el modelo de EF es del 37%. No obstante, la posición de esta carga máxima se localiza en el mismo puntal en los dos modelos. La figura 5.23 muestra una comparación

entre la distribución de cargas de los puntales del forjado 2 para el modelo experimental y para el modelo de EF. La diferencia entre la carga máxima de los puntales del forjado 2 fue de un 13%.

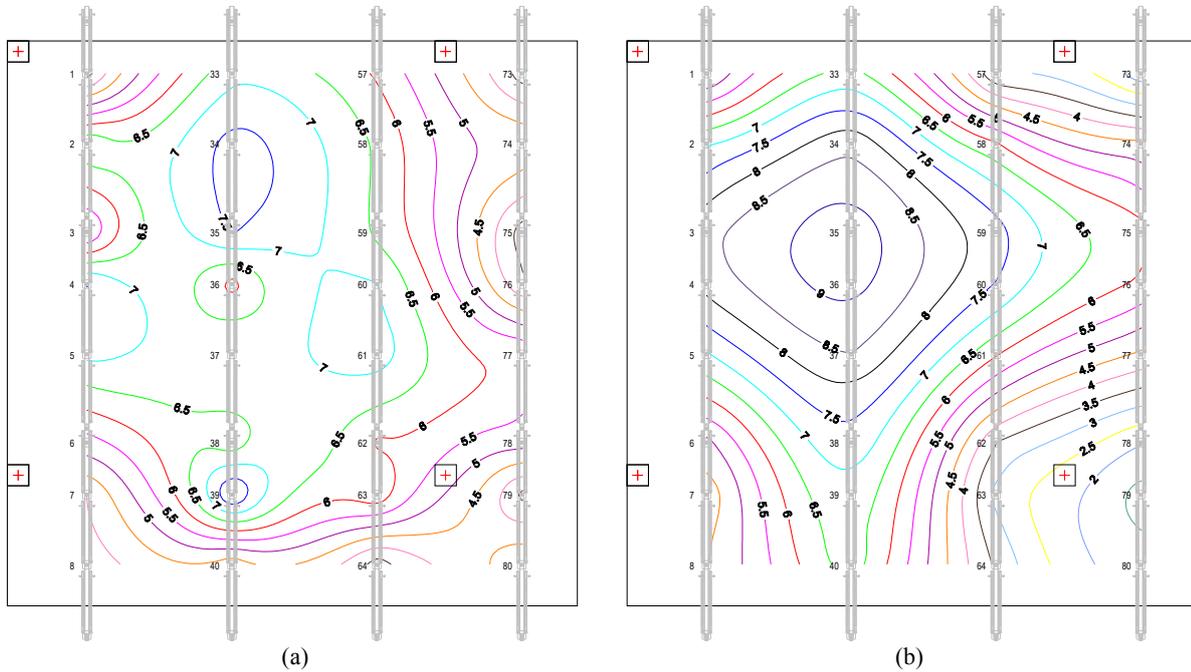


Fig. 5.23 Distribución de cargas en puntales del forjado 2. Clareado del forjado 2. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)

### 5.4.5. Paso de carga 5 (Descimbrado del forjado 1)

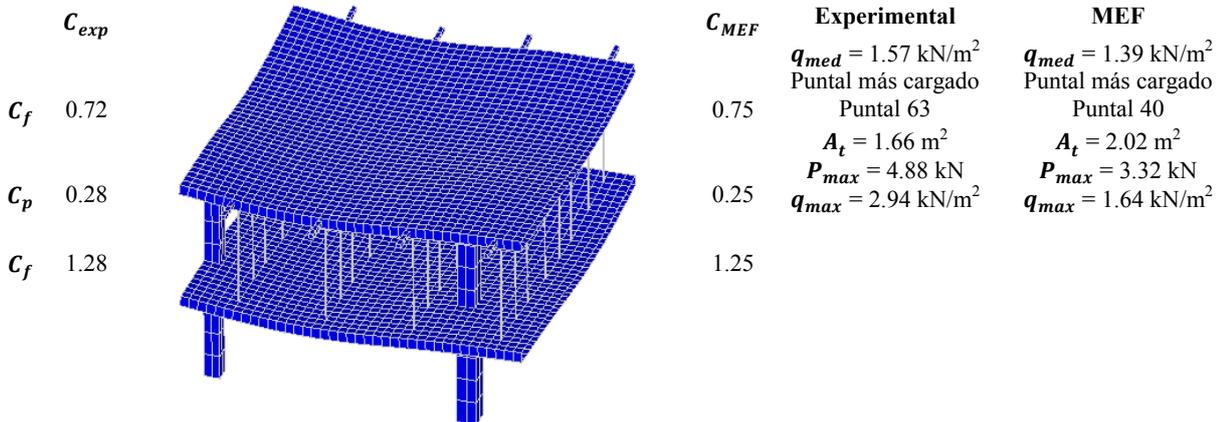


Fig. 5.24 Resultados del modelo numérico. Paso de carga 5 (Descimbrado del forjado 1)

El paso de carga 5 consistió en modelar el descimbrado del forjado 1. La Figura 5.24 muestra los resultados de dicho paso de carga. En esta Figura se observa un error del 13% entre las medidas experimentales y los resultados del modelo numérico ( $q_{med,exp}/q_{med,MEF} = 1.13$ ).

La distribución de cargas en los puntales del forjado 2 para el modelo experimental y para el modelo numérico se muestra en la Figura 5.25. En ésta figura se observa que las cargas de los puntales del



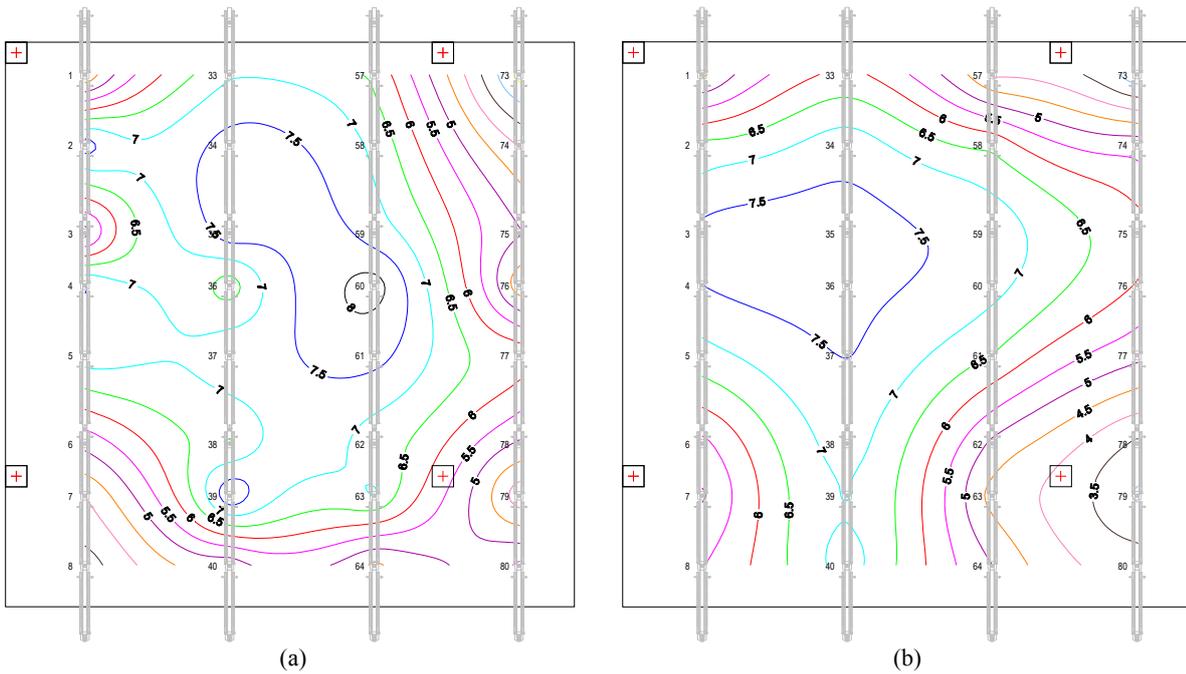


Fig. 5.27 Distribución de cargas en puntales del forjado 2. Hormigonado del forjado 3. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)

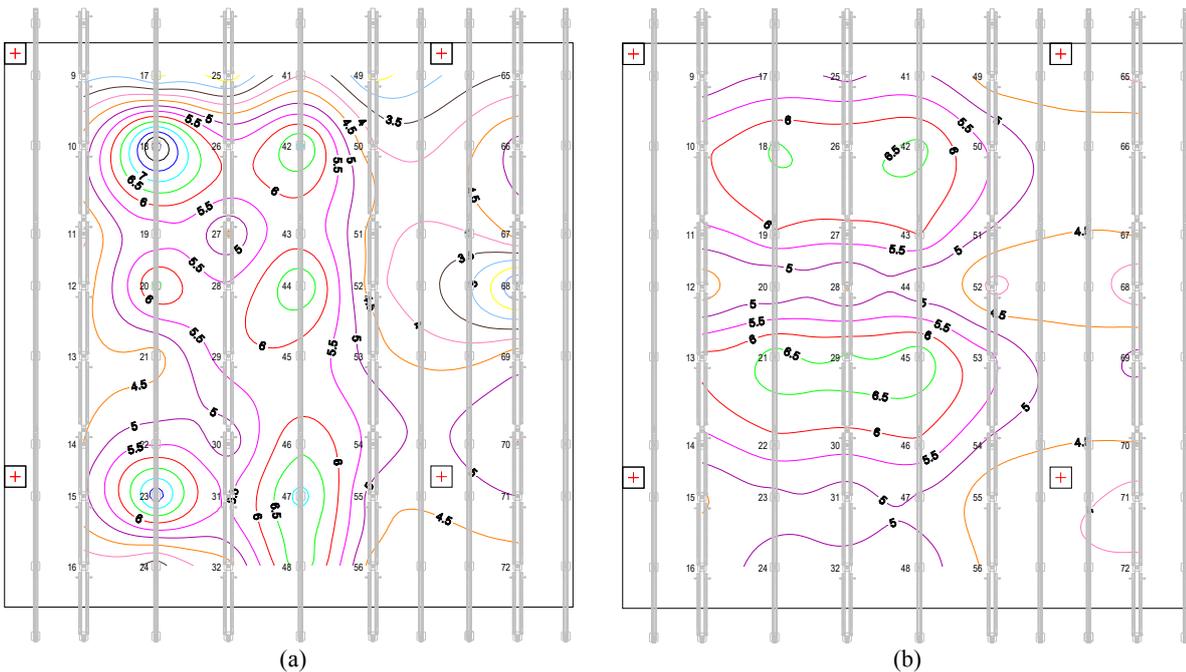


Fig. 5.28 Distribución de cargas en puntales del forjado 3. Hormigonado del forjado 3. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)

En la figura 5.26 se muestra el paso de carga 6 que consiste en el hormigonado del forjado 3. En esta fase del proceso constructivo el grado de ajuste entre los resultados del modelo numérico y las medidas experimentales es muy alto. La relación de la carga media en puntales entre el modelo experimental y el modelo numérico es de 1.01 para los puntales del forjado 2 y de 0.95 para los puntales del forjado 3. La distribución de cargas en los puntales de los forjados 2 y 3 se muestra en las

figuras 5.27 y 5.28. La carga máxima en los puntales del forjado 2 presenta un error entre el modelo experimental y el numérico del 8%. Para los puntales del forjado 1 el error fue de un 29%.

**5.4.7. Paso de carga 7 (Clareado del forjado 3)**

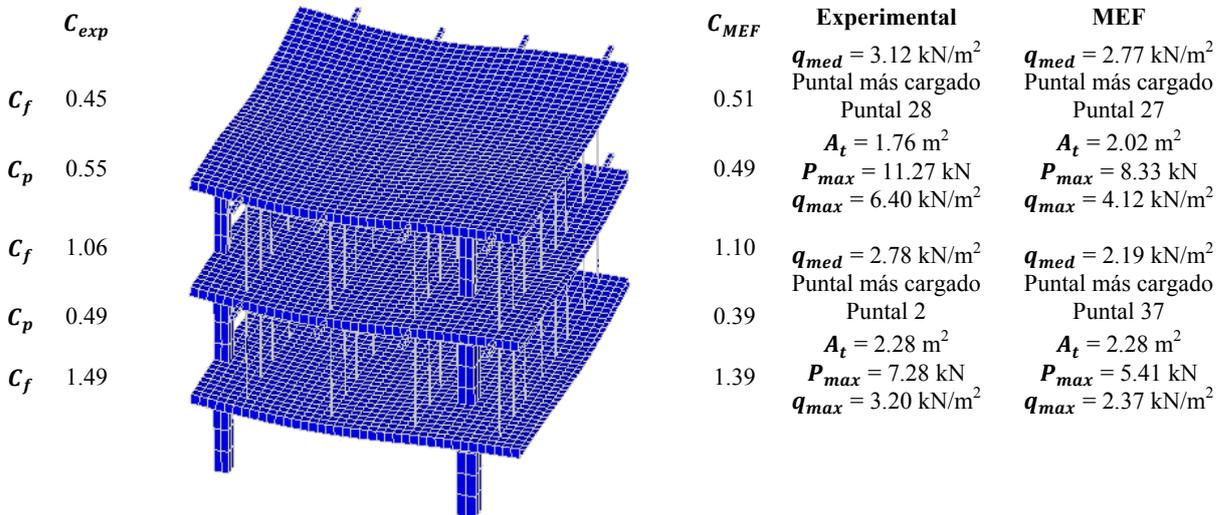


Fig. 5.29 Resultados del modelo numérico. Paso de carga 7 (Clareado del forjado 3)

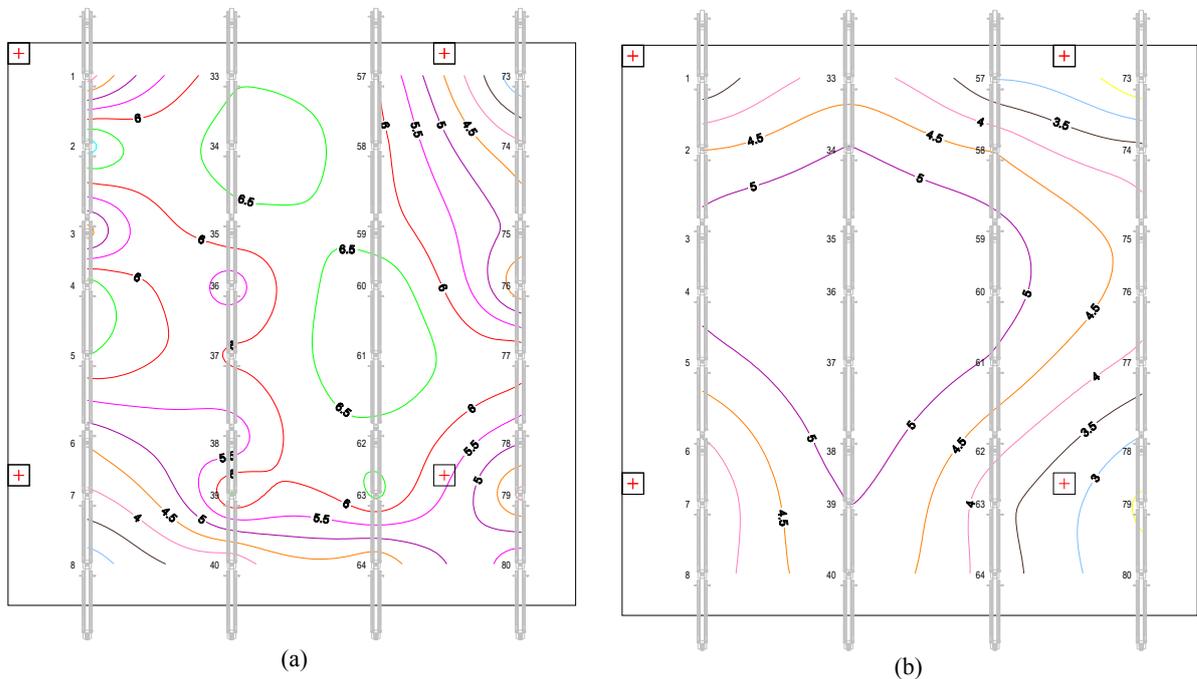


Fig. 5.30 Distribución de cargas en puntales del forjado 2. Clareado del forjado 3. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)

En la Figura 5.29 se muestra una comparación entre las medidas experimentales y los resultados del modelo numérico para el clareado del tercer forjado. El grado de ajuste entre las medidas

experimentales y los resultados del modelo numérico para las cargas en los puntales del forjado 2 es de 1.27 ( $q_{med,exp}/q_{med,MEF}$ ). Para los puntales del forjado 3 el ratio  $q_{med,exp}/q_{med,MEF}$  es de 1.13.

La carga máxima en los puntales de los forjados 2 y 3 presentó un error de un 35% entre los resultados del modelo de EF y del modelo experimental. Las figuras 5.30 y 5.31 muestran una comparación de la distribución de cargas entre el modelo experimental y el modelo de EF para los puntales de los forjados 2 y 3 respectivamente.

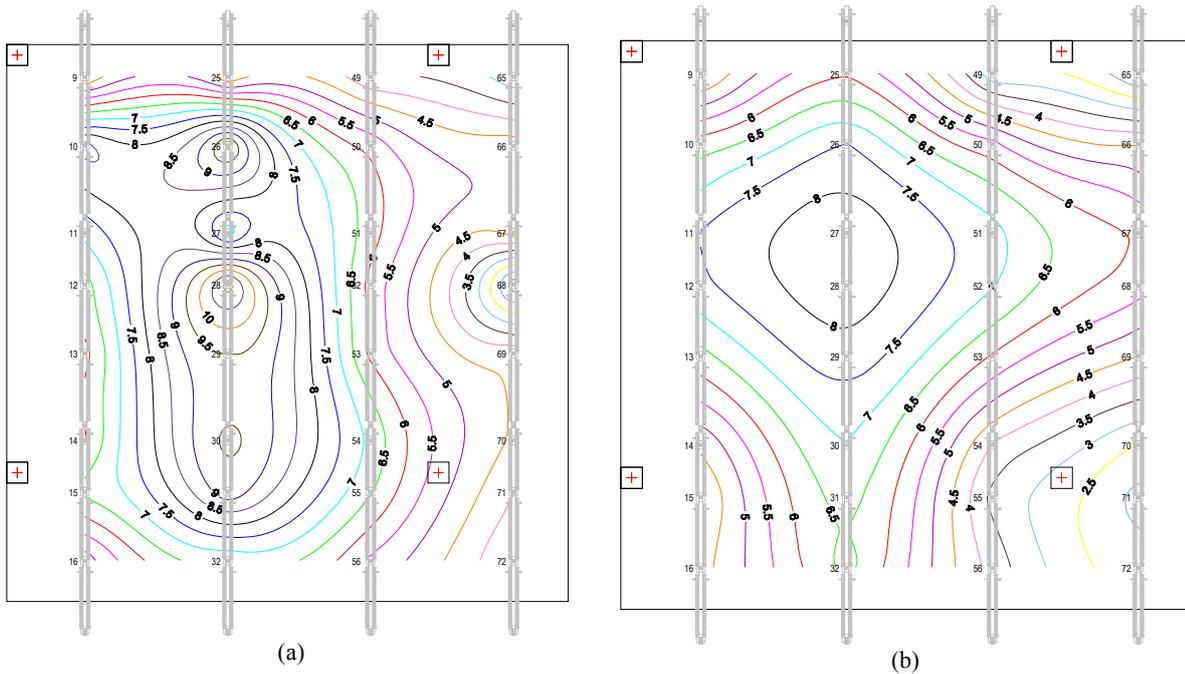


Fig. 5.31 Distribución de cargas en puntales del forjado 3. Clareado del forjado 3. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)

#### 5.4.8. Paso de carga 8 (Carga en el forjado 3)

La figura 5.32 muestra un resumen de las medidas experimentales comparándolas con los resultados del modelo de EF tras aplicar una carga uniformemente repartida sobre el forjado 3. En esta Figura se observa un buen grado de ajuste entre los valores de carga en puntales determinados experimental y numéricamente. Así, en el caso de los puntales del forjado 2 la diferencia entre ambos modelos fue nula, mientras que para los puntales del forjado 3 la diferencia entre el modelo experimental y el modelo numérico fue de un 19%.

La posición de la carga máxima en los puntales del forjado 2 está en la misma zona para los dos modelos, con un error en el valor de carga de apenas un 1% ( $P_{max,exp}/P_{max,MEF} = 0.99$ ). En la caso de los puntales bajo el forjado 3 la ubicación de la carga máxima se corresponde a una misma zona en ambos modelos con un error en el valor de dicha carga de un 9% ( $P_{max,exp}/P_{max,MEF} = 1.09$ ).

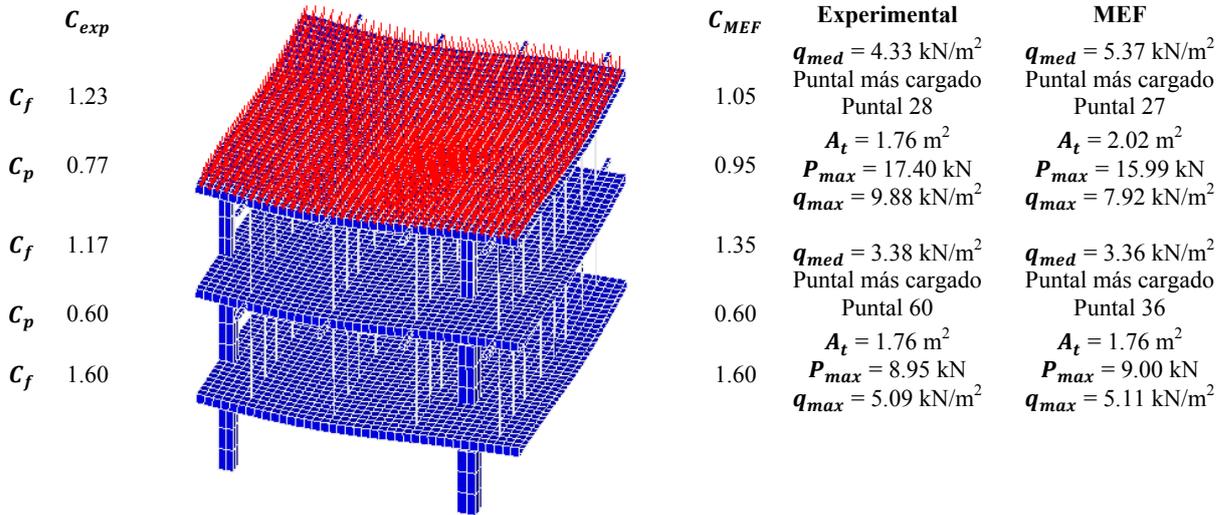


Fig. 5.32 Resultados del modelo numérico. Paso de carga 8 (Carga en el forjado 3)

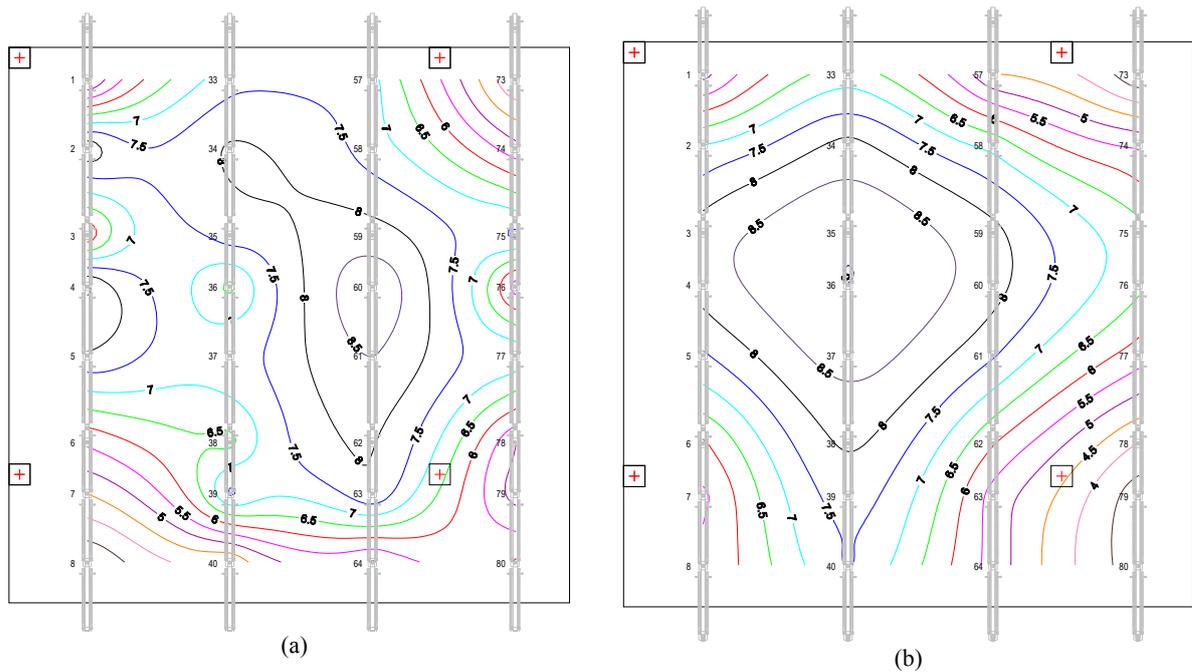


Fig. 5.33 Distribución de cargas en puntales del forjado 2. Carga en el forjado 3. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)

Las figura 5.32 muestra, comparativamente, cómo se distribuyen las cargas en los puntales del forjado 2 en el modelo experimental y en el modelo de EF. Asimismo, la figura 5.33 muestra la distribución de cargas en los puntales del forjado 3.

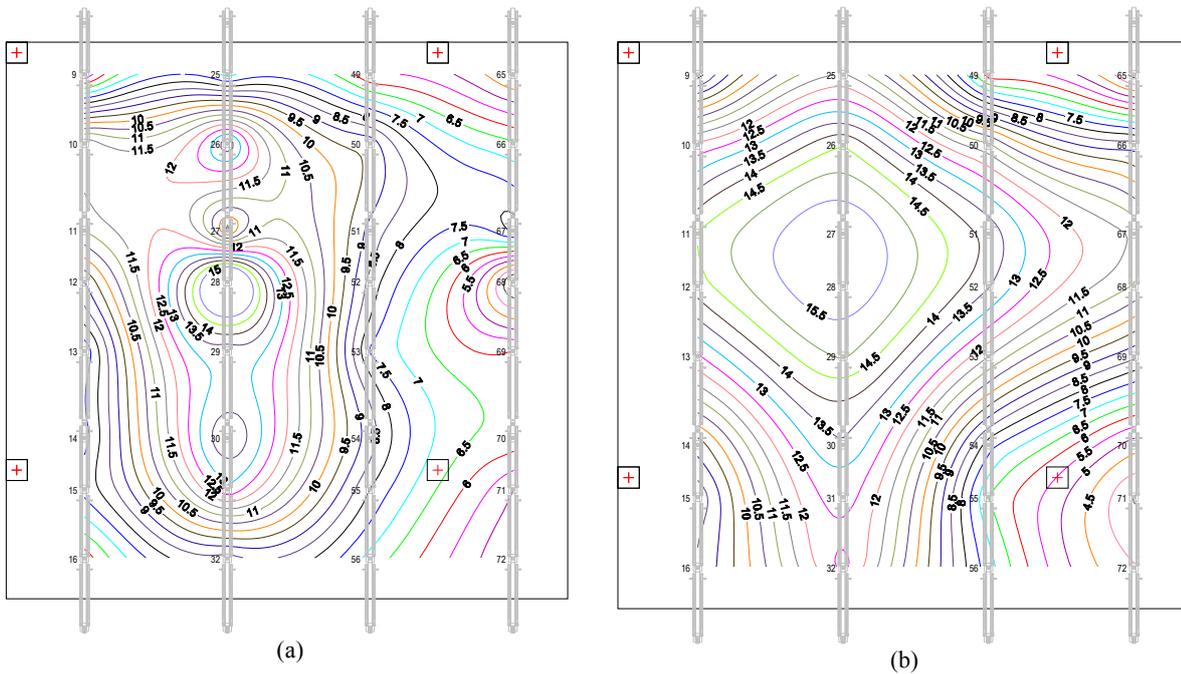


Fig. 5.34 Distribución de cargas en puntales del forjado 3. Carga en el forjado 3. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)

#### 5.4.9. Paso de carga 9 (Descimbrado del forjado 2)

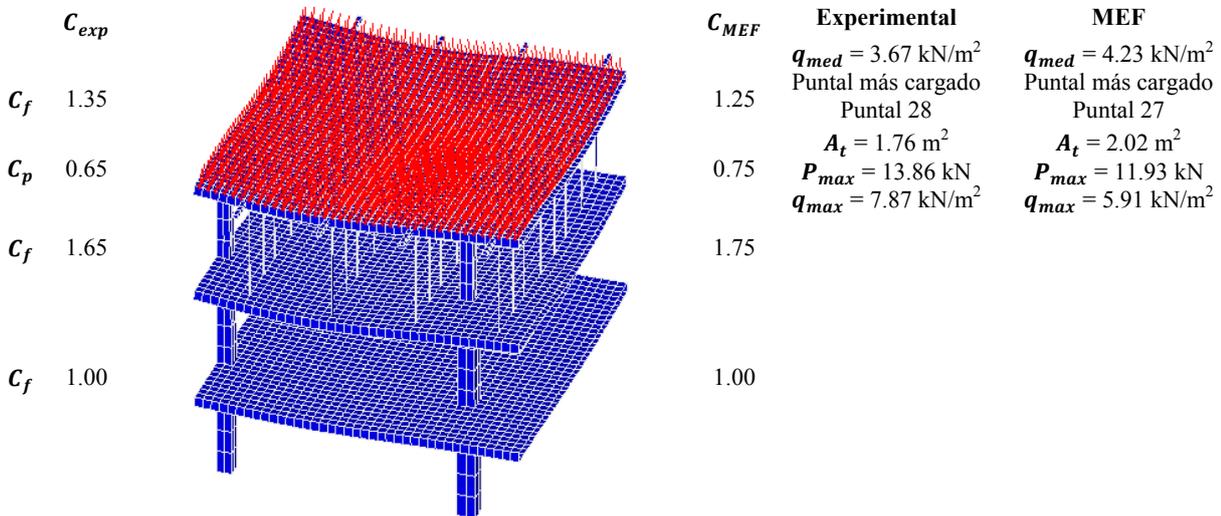


Fig. 5.35 Resultados del modelo numérico. Paso de carga 9 (Descimbrado del forjado 2)

En la figura 5.35 se recogen los resultados de los modelos experimental y de EF para el descimbrado del forjado 2. La carga media por unidad de superficie presenta un error del 13% entre los valores numéricos y los experimentales. La relación de cargas máximas  $P_{max,exp}/P_{max,MEF}$  es de 1.16. La figura 5.36 muestra comparativamente como se distribuyen las cargas en los puntales del forjado 3 en el modelo experimental y en el modelo de EF.

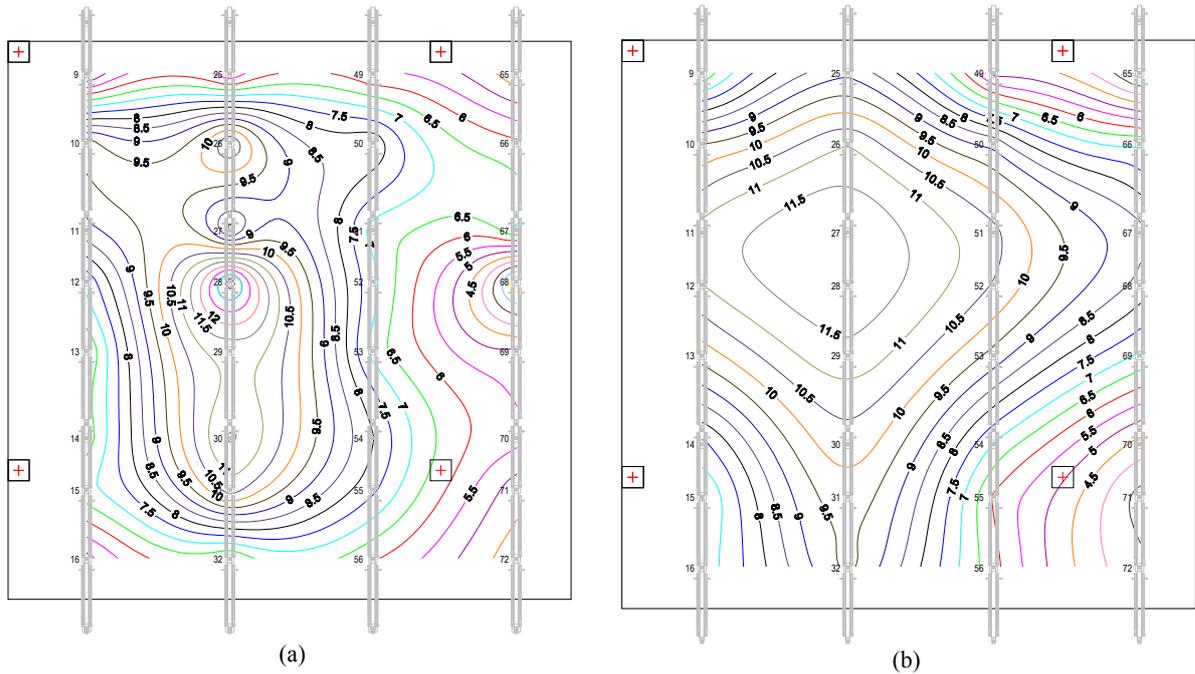


Fig. 5.36 Distribución de cargas en puntales del forjado 3. Descimbrado del forjado 2. (a) Cargas medidas experimentalmente. (b) Cargas del modelo de EF (kN)

#### 5.4.10. Resumen de la verificación del modelo de EF

A continuación se muestra un resumen de los resultados del modelo de EF, comparándolos con las medidas instantáneas del modelo experimental.

Tabla 5.4 Comparación entre las medidas experimentales y los resultados del modelo numérico

Paso de carga	Operación	Nivel	Experimental $q_{med,exp}$ (kN/m <sup>2</sup> )	Númérico $q_{med,MEF}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\frac{q_{med,exp}}{q_{med,MEF}}$	Experimental $P_{max,exp}$ (kN)	Númérico $P_{max,MEF}$ (kN)	$\frac{P_{max,exp}}{P_{max,MEF}}$
1	Hormigonado forjado 1	1	5.46	5.52	0.99	7.71	6.85	1.13
2	Clareado forjado 1	1	3.07	3.41	0.90	8.43	10.91	0.77
3	Hormigonado forjado 2	2	5.60	5.80	0.97	8.63	6.85	1.26
		1	4.48	6.60	0.68	14.57	21.37	0.68
4	Clareado forjado 2	2	2.91	2.90	1.00	8.08	9.25	0.87
		1	3.86	5.33	0.72	11.30	17.92	0.63
5	Descimbrado forjado 1	2	1.57	1.39	1.13	4.88	3.32	1.47
6	Hormigonado forjado 3	3	5.50	5.80	0.95	8.84	6.85	1.29
		2	3.07	3.04	1.01	8.23	7.64	1.08
7	Clareado forjado 3	3	3.12	2.77	1.13	11.27	8.33	1.35
		2	2.78	2.19	1.27	7.28	5.41	1.35
8	Carga forjado 3	3	4.33	5.37	0.81	17.40	15.99	1.09
		2	3.38	3.36	1.01	8.95	9.00	0.99
9	Descimbrado forjado 2	3	3.67	4.23	0.87	13.86	11.93	1.16
-	<b>Media</b>	-	-	-	0.96	-	-	1.08
-	<b>Desviación Típica</b>	-	-	-	0.15	-	-	0.25

En la Tabla 5.4 se muestra una comparación entre los valores de la carga media en puntales obtenidos del modelo experimental y del modelo de EF. En general, el grado de ajuste entre ambos resultados es bueno. La media de la relación  $q_{med,exp}/q_{med,MEF}$  de todas las fases de construcción es de 0.96 con una desviación típica de 0.15.

Si sólo se analiza la operación del clareado, los resultados obtenidos por ambos modelos tienen un grado de ajuste alto. Siendo la media de la relación  $q_{med,exp}/q_{med,MEF}$  para el clareado de los tres forjados de 1.01 con una desviación típica de 0.09.

Las máximas diferencias, para las cargas medias en puntales se presentan en los puntales del forjado 1 al hormigonar el forjado 2, y en los puntales del forjado 2 al descimbrar el forjado 1. Estas diferencias están relacionadas con el error cometido en el modelo experimental, al retirar los fondos de encofrado del forjado 1, una vez este forjado se encontraba clareado (ver apartado 4.3.2). Esto causó una redistribución de cargas entre forjado y puntales que no se ha tenido en cuenta en el modelo numérico.

Además, en la Tabla 5.4 se comparan los valores de la carga máxima en puntales de las medidas experimentales y de los resultados del modelo de EF. La media de la relación  $P_{max,exp}/P_{max,MEF}$  del total de las fases de construcción es de 1.08 con una desviación típica de 0.25.

Existen considerables diferencias entre los valores de carga máxima en puntales, tanto del modelo experimental como del modelo de EF. Esto se puede observar en las diferentes figuras de distribución de cargas mostradas anteriormente. La principal razón de esta diferencia se debe a que durante la construcción del modelo experimental resulta imposible asegurar que todos los puntales se encuentren ajustados de la misma forma. Así, si un puntal se encuentra excesivamente apretado, los puntales de alrededor recibirán menos carga, y si un puntal está escasamente apretado se producirá el efecto inverso.

## **5.5. Comparación del proceso de CCD con un proceso de CD**

En el presente apartado se comparan, con la ayuda del modelo de EF descrito anteriormente, el proceso de CCD frente a un proceso de CD.

Las características de la estructura son las que se describen en el Capítulo 3, y el modelo de EF se muestra en la Figura 5.4. Las fases o pasos de carga del proceso de CCD se describen en el apartado 5.3. La evolución de las propiedades de los materiales son las desarrolladas en el Apéndice V aplicando la técnica de la madurez.

Para el proceso de cimbrado y descimbrado las fases o pasos de carga son las siguientes:

- a. Paso de carga 1 (Hormigonado del forjado 1) (0 días). Consistió en desactivar los elementos de los forjados superiores, incluida su estructura temporal (puntales, sopandas y encofrado), dejando solo activados los elementos del forjado 1 con su sistema de cimbrado (véase Figura 5.37 (a)).
- b. Paso de carga 2 (Hormigonado del forjado 2) (7 días). Se activaron el conjunto de elementos del forjado 2 incluidos pilares, encofrado, sopandas y puntales (véase Figura 5.37 (b)).

- c. Paso de carga 3 (Descimbrado del forjado 1) (14 días). En este paso de carga se desactivaron los puntales, sopandas y encofrado del forjado 1 (véase Figura 5.37 (c)).
- d. Paso de carga 4 (Hormigonado del forjado 3) (17 días). Se activaron los elementos del forjado 3 incluyendo sus pilares y su sistema de cimbrado (encofrado, sopandas y puntales) (véase Figura 5.37 (d)).
- e. Paso de carga 5 (Carga en el forjado 2) (24 días). Se aplicó una carga uniforme, simulando el peso de otro forjado de las mismas características, sobre los elementos del forjado 3 (véase Figura 5.37 (e)).
- f. Paso de carga 6 (Descimbrado del forjado 3) (25 días). El último paso de carga consistió en desactivar los puntales bajo el 2 (véase Figura 5.37 (f)).

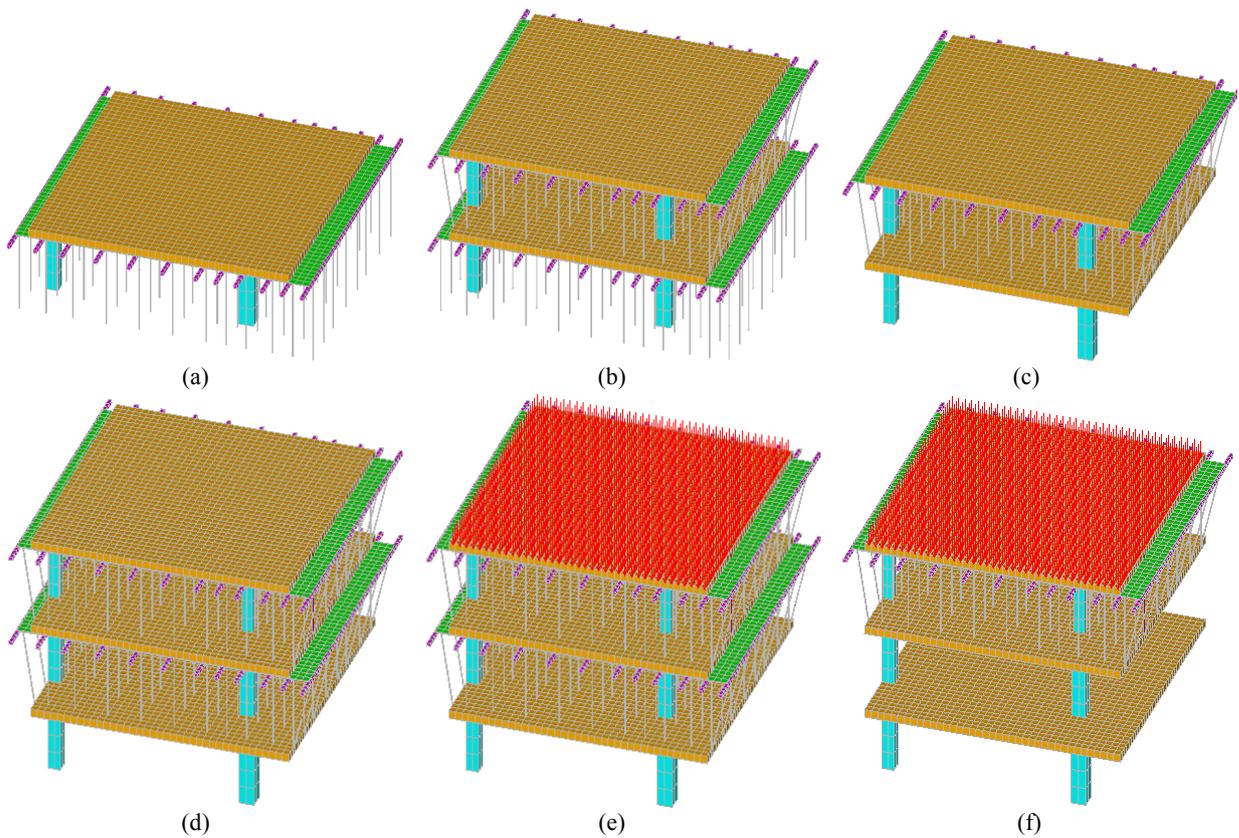


Fig. 5.37 Pasos de carga del modelo de EF para el proceso de CD

El número de días para realizar cada una de las operaciones de construcción coincide para las fases en común de ambos procesos. Para cada una de las fases de construcción afines se evalúan las cargas medias, máximas y su distribución en el conjunto de puntales. La equivalencia entre los pasos de carga del proceso de CD y el proceso de CCD es la siguiente:

- ✓ Paso de carga 1 (Hormigonado del forjado 1) del proceso de CD con el paso de carga 1 del proceso de CCD (Hormigonado del forjado 1).
- ✓ Paso de carga 2 (Hormigonado del forjado 2) del proceso de CD con el paso de carga 3 del proceso de CCD (Hormigonado del forjado 2).

- ✓ Paso de carga 3 (Descimbrado del forjado 1) del proceso de CD con el paso de carga 5 del proceso de CCD (Descimbrado del forjado 1).
- ✓ Paso de carga 4 (Hormigonado del forjado 3) del proceso de CD con el paso de carga 6 del proceso de CCD (Hormigonado del forjado 3).
- ✓ Paso de carga 5 (Carga en el forjado 3) del proceso de CD con el paso de carga 8 del proceso de CCD (Carga en el forjado 3).
- ✓ Paso de carga 6 (Descimbrado del forjado 2) del proceso de CD con el paso de carga 9 del proceso de CCD (Descimbrado del forjado 2).

### 5.5.1. Paso de carga 1 (Hormigonado del forjado 1)

En esta fase constructiva se presentan las mismas cargas en puntales para los procesos de CD y de CCD.

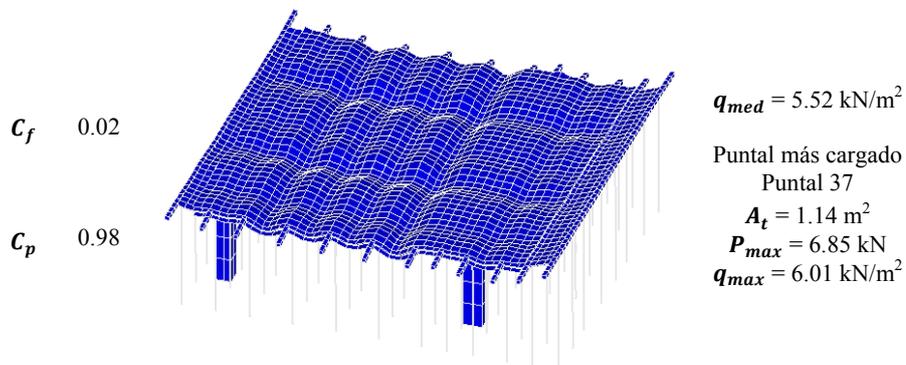


Fig. 5.38 Resultados del proceso de CD, y del proceso de CCD. Paso de carga 1 (Hormigonado del forjado 1)

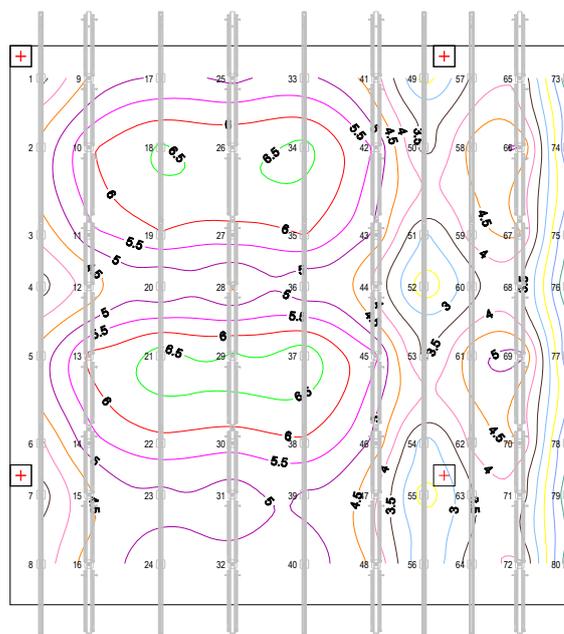


Fig. 5.39 Distribución de cargas en puntales del forjado 1 Hormigonado del forjado 1. Proceso de CD, y proceso de CCD (kN)

Así, en la Figura 5.38 se muestra un resumen de los resultados más importantes para ambos procesos. La Figura 5.39 muestra la distribución de cargas en los puntales del forjado 1.

### 5.5.2. Paso de carga 2 (Hormigonado del forjado 2)

La Figura 5.40 muestra los resultados del modelo de EF al hormigonar el segundo forjado considerando un proceso de CD. La figura 5.41 muestra los resultados para el proceso de CCD. Es de mencionar que en el proceso de CCD, el forjado 1, antes de hormigonar el forjado 2, se encuentra clareado. Las propiedades del hormigón del forjado 1 corresponden a una edad de 7 días.

Como es lógico las cargas en los puntales del forjado 2 son prácticamente iguales. Esto es debido a que la única operación que involucra a estos puntales en ambos procesos es el hormigonado del forjado 2.

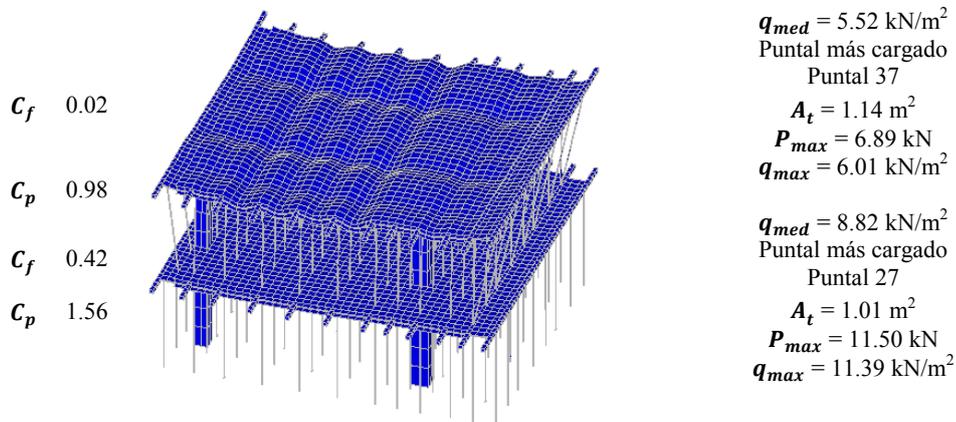


Fig. 5.40 Resultados del proceso de CD. Paso de carga 2 (Hormigonado del forjado 2)

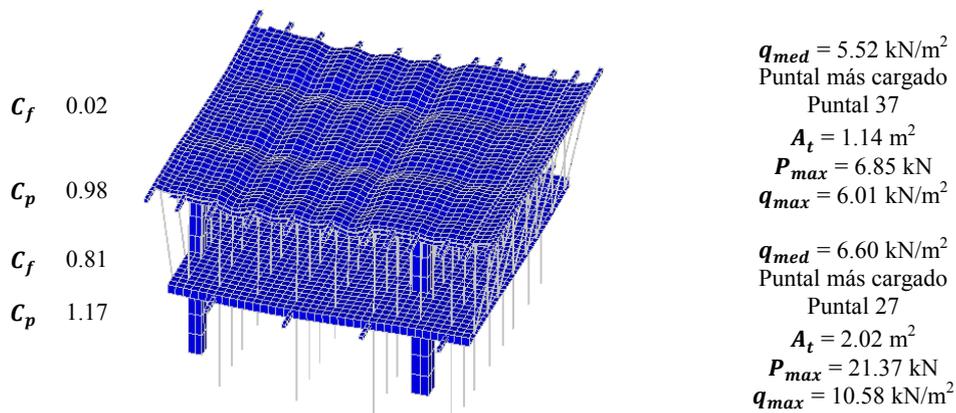


Fig. 5.41 Resultados del proceso de CCD. Paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2)

Las cargas en los puntales del forjado 1 presentan importantes diferencias entre los dos procesos constructivos (véase Figura 5.42). La carga media de los puntales para el proceso de CD es un 34% superior a la carga para un proceso donde se realiza la operación de clareado.

La diferencia más importante está en la carga máxima en puntales, siendo la relación entre la carga máxima para el proceso de CCD y la carga máxima para el proceso de CD de 1.86.

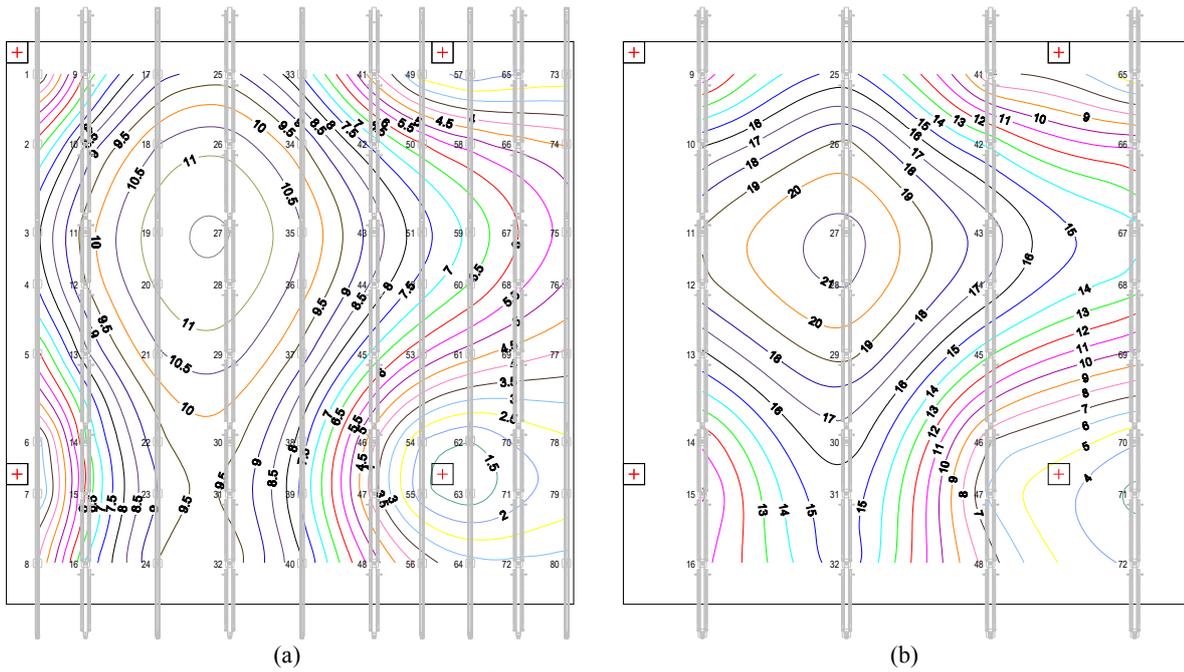


Fig. 5.42 Distribución de cargas en puntales del forjado 1 Hormigonado del forjado 2. (a) Proceso de CD (b) Proceso de CCD (kN)

Para el forjado 2 las cargas en los puntales en ambos procesos son muy similares. La Figura 5.43 muestra la distribución de cargas en los puntales del forjado 2 para los proceso de CD y CCD.

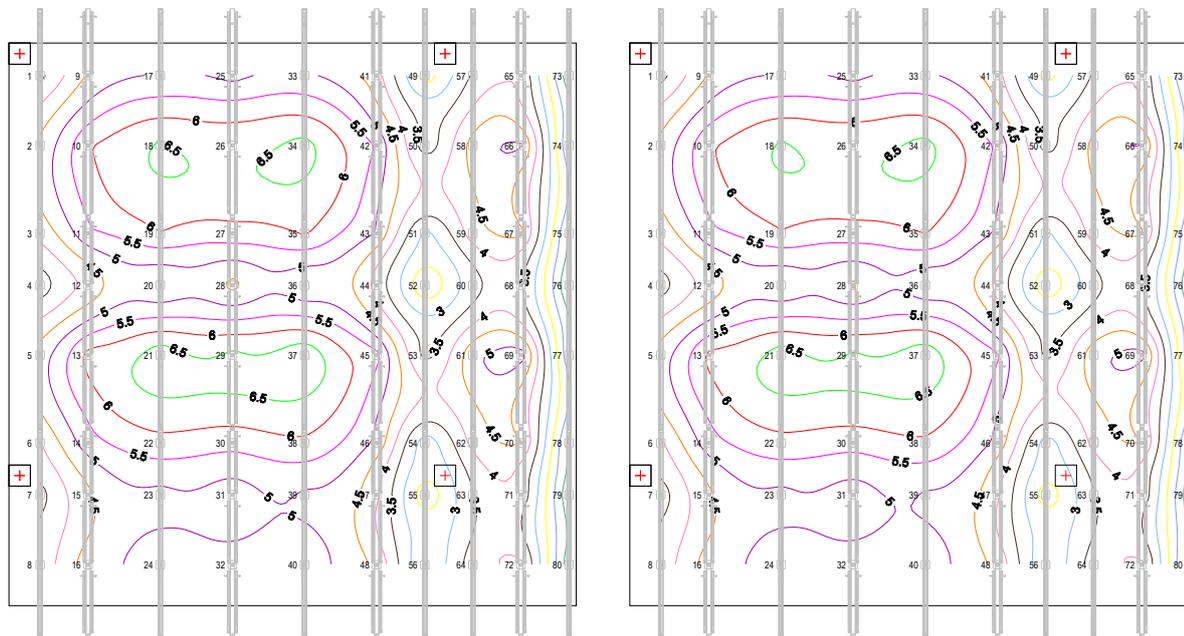


Fig. 5.43 Distribución de cargas en puntales del forjado 2 Hormigonado del forjado 2. (a) Proceso de CD (b) Proceso de CCD (kN)

### 5.5.3. Paso de carga 3 (Descimbrado del forjado 1)

Las figuras 5.44 y 5.45 muestran los resultados del modelo de EF al descimbrar el primer forjado para los procesos de CD y de CCD respectivamente. El forjado 2 en el proceso de CCD antes de descimbrar el forjado 1 se encuentra clareado.

La carga media por unidad de superficie de los puntales es muy similar para ambos procesos. Siendo un 7% superior la carga media para un proceso de CD respecto a la del proceso de CCD.

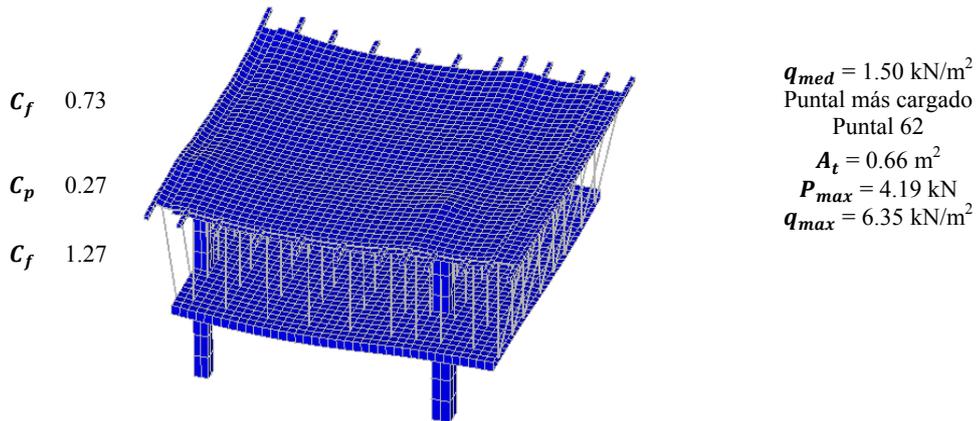


Fig. 5.44 Resultados del proceso de CD. Paso de carga 3 (Descimbrado del forjado 1)

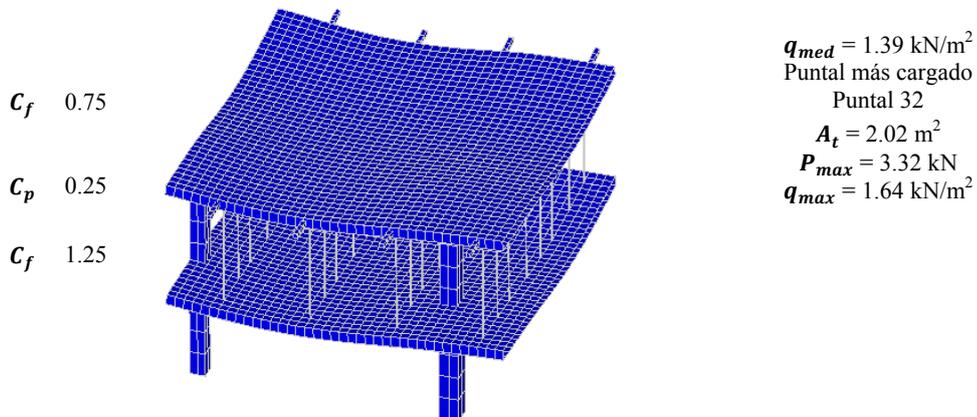


Fig. 5.45 Resultados del proceso de CCD. Paso de carga 5 (Descimbrado del forjado 1)

La distribución de cargas en los puntales para cada proceso es muy diferente (véase la Figura 5.46). Esto se hace evidente en la posición del puntal que tiene la carga máxima. Además la carga máxima en puntales en el proceso de CD es 1.26 veces superior a la obtenida en un proceso de CCD.

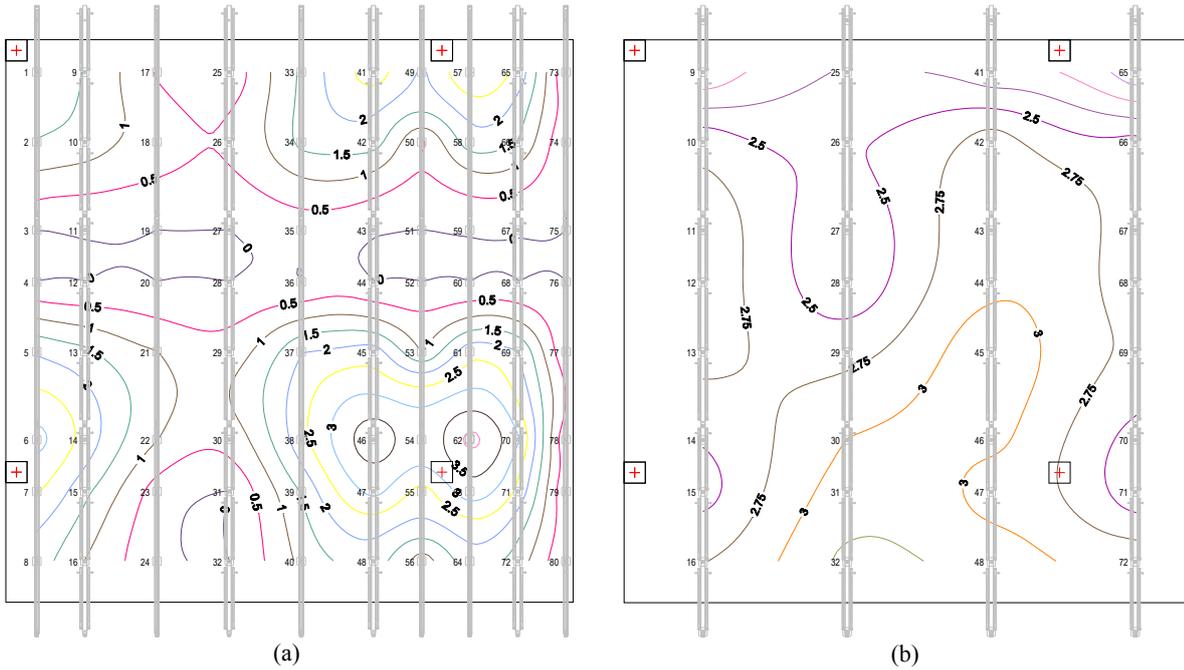


Fig. 5.46. Distribución de cargas en puntales del forjado 2 Descimbrado del forjado 1. (a) Proceso de CD (b) Proceso de CCD (kN)

### 5.5.4. Paso de carga (Hormigonado del forjado 3)

En las Figuras 5.47 y 5.48 se muestran los resultados del modelo de EF para los procesos de CD y CCD respectivamente, al hormigonar el tercer forjado.

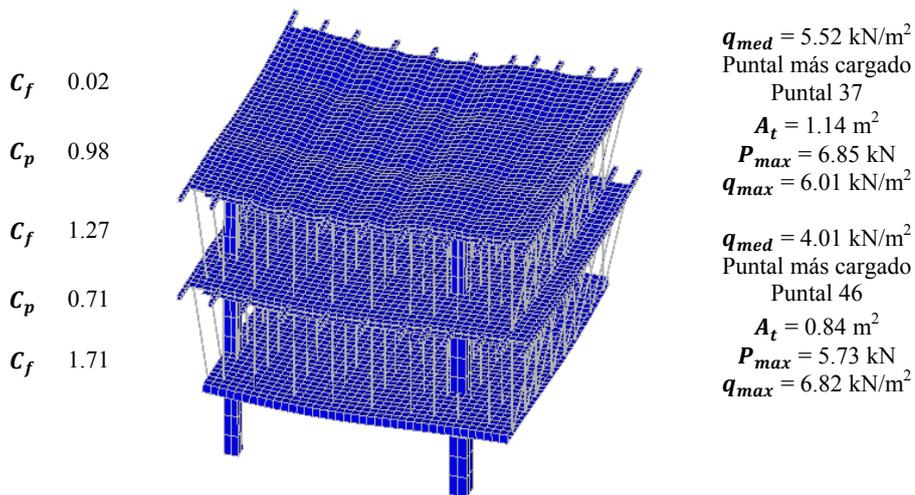


Fig. 5.47 Resultados del proceso de CD. Paso de carga 4 (Hormigonado del forjado 3)

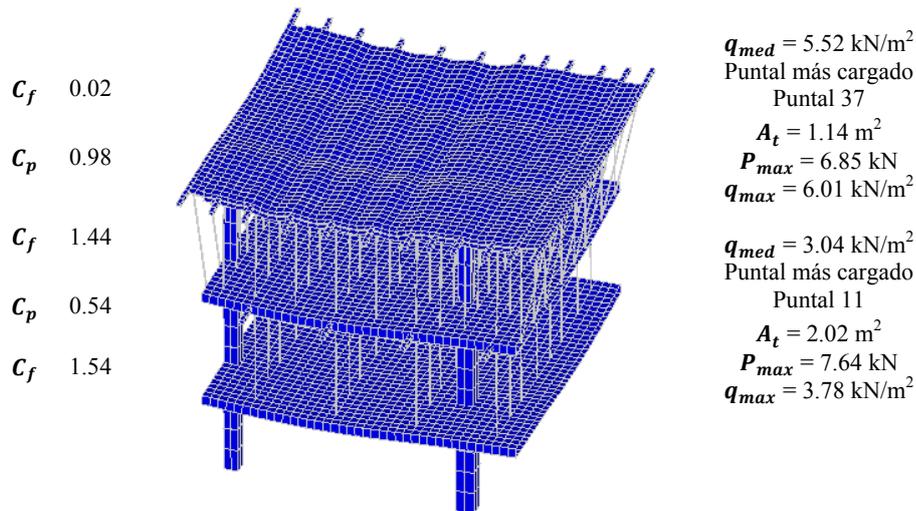


Fig. 5.48 Resultados del proceso de CCD. Paso de carga 6 (Hormigonado del forjado 3)

Las cargas de los puntales del forjado 3, en los dos modelos, son muy similares. El forjado 2, que se encuentra clareado, asume el 69% del peso del forjado 3 frente al 54% que asume este mismo forjado en un proceso de CD. Así, la carga media de los puntales del forjado 2 para el proceso de CD es un 32% mayor que la relativa a un proceso de CCD.

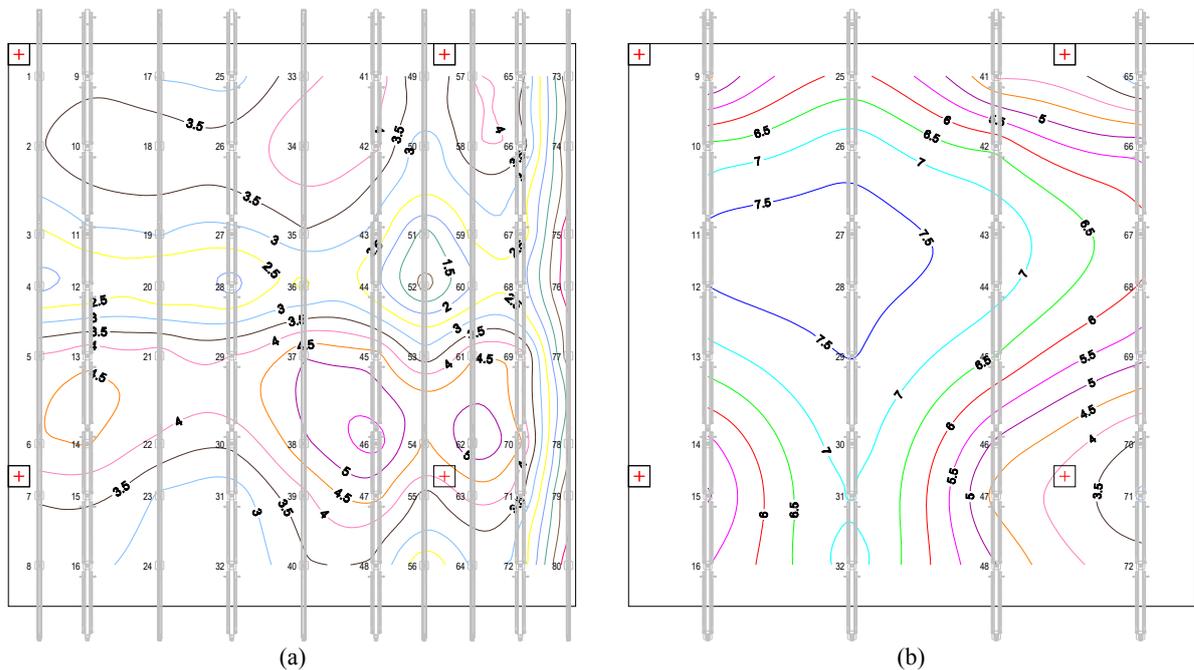


Fig. 5.49 Distribución de cargas en puntales del forjado 2 Hormigonado del forjado 3. (a) Proceso de CD (b) Proceso de CCD (kN)

La carga máxima en los puntales del forjado 2 es superior en el forjado clareado que en el forjado completamente cimbrado. La carga máxima para el proceso que incluye el clareado es un 33% mayor que en un proceso de CD. La distribución de cargas en los puntales del forjado 2, para ambos procesos constructivos, se muestra en la Figura 5.49. La Figura 5.50 muestra la distribución de cargas en puntales para el forjado 3 de los dos procesos constructivos, que resultan ser muy similares.

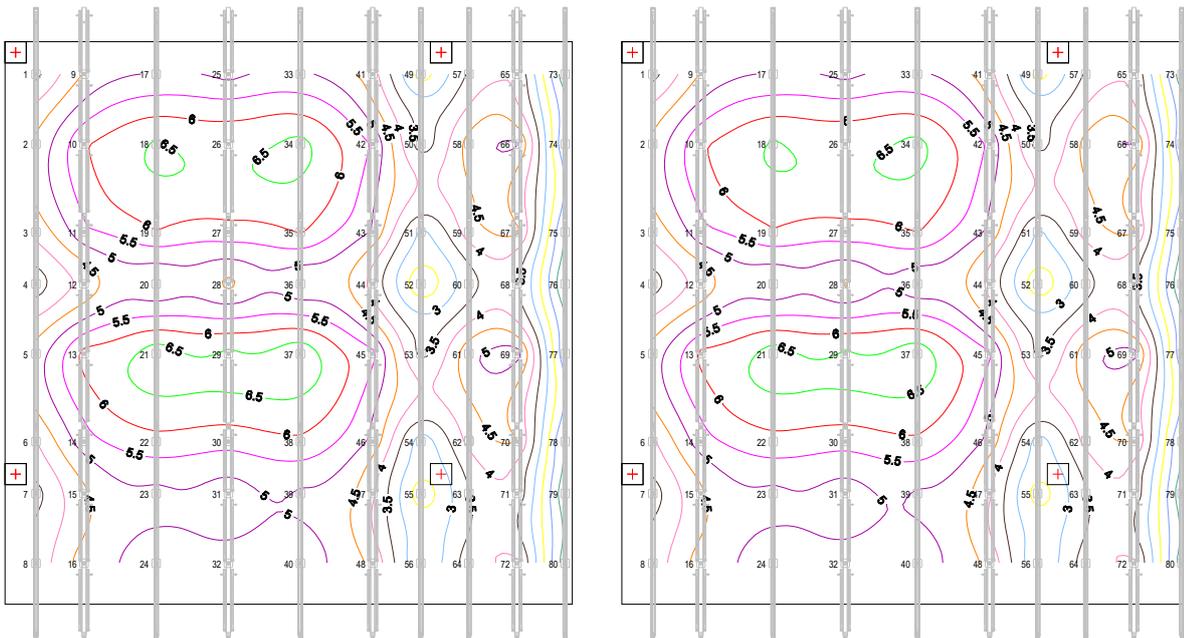


Fig. 5.50 Distribución de cargas en puntales del forjado 3. Hormigonado del forjado 3. (a) Proceso de CD (b) Proceso de CCD (kN)

### 5.5.5. Paso de carga 5 (Carga en el forjado 3)

La Figura 5.51 muestra los resultados del modelo de EF para un proceso de CD. En la Figura 5.52 se muestran los resultados de modelo de EF para un proceso de CCD. En este último proceso, el forjado 3 está previamente clareado.

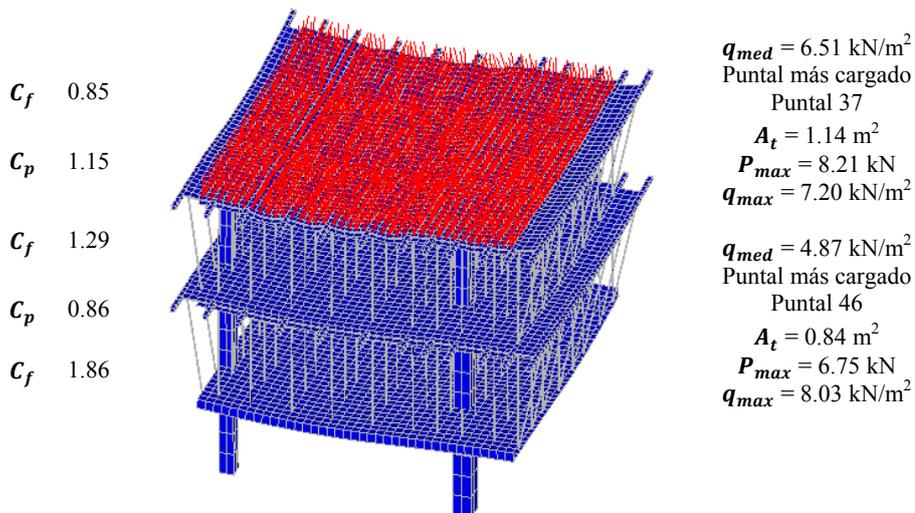


Fig. 5.51 Resultados del proceso de CD. Paso de carga 5 (Carga en el forjado 3)

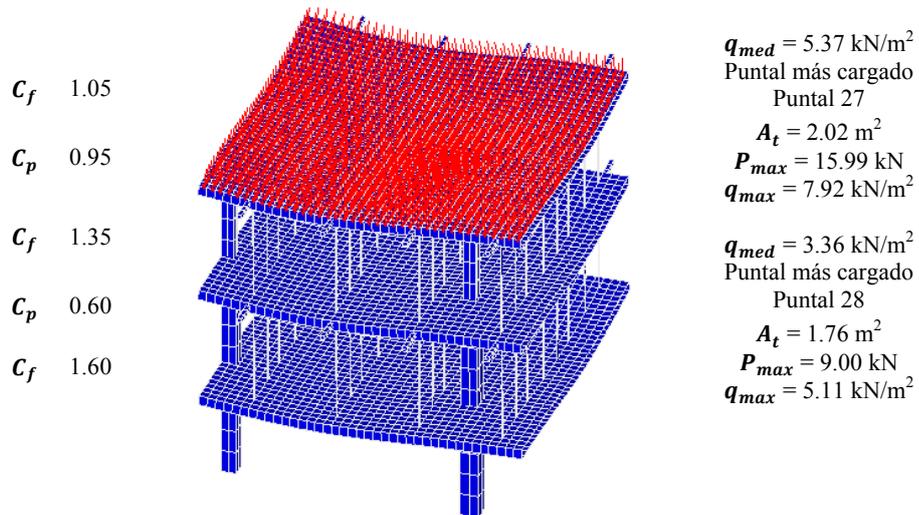


Fig. 5.52 Resultados del proceso de CCD. Paso de carga 8 (Carga en el forjado 3)

La carga media por unidad de superficie de los puntales de los forjados 2 y 3 es mayor para el proceso de CD. Los puntales de los forjados 2 y 3, en un proceso de CD, tienen un 45% y un 21% más de carga que en un proceso de CCD.

La carga máxima para los dos forjados es mayor para el proceso de CCD. Las cargas máximas de los puntales en los forjados 2 y 3 son un 33% y un 95% superiores para un proceso de CCD. La distribución de cargas para los puntales de los forjados 2 y 3, para los procesos de CD y CCD, se incluyen en las Figuras 5.53 y 5.54 respectivamente.

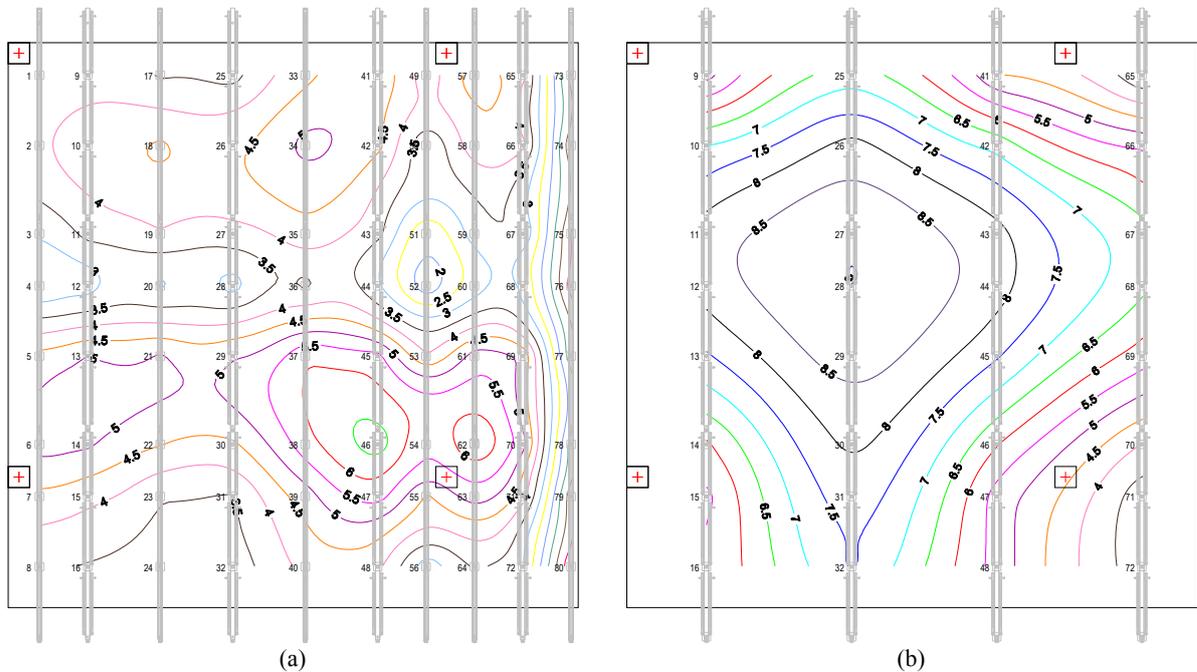


Fig. 5.53 Distribución de cargas en puntales del forjado 2. Carga en el forjado 3. (a) Proceso de CD (b) Proceso de CCD (kN)

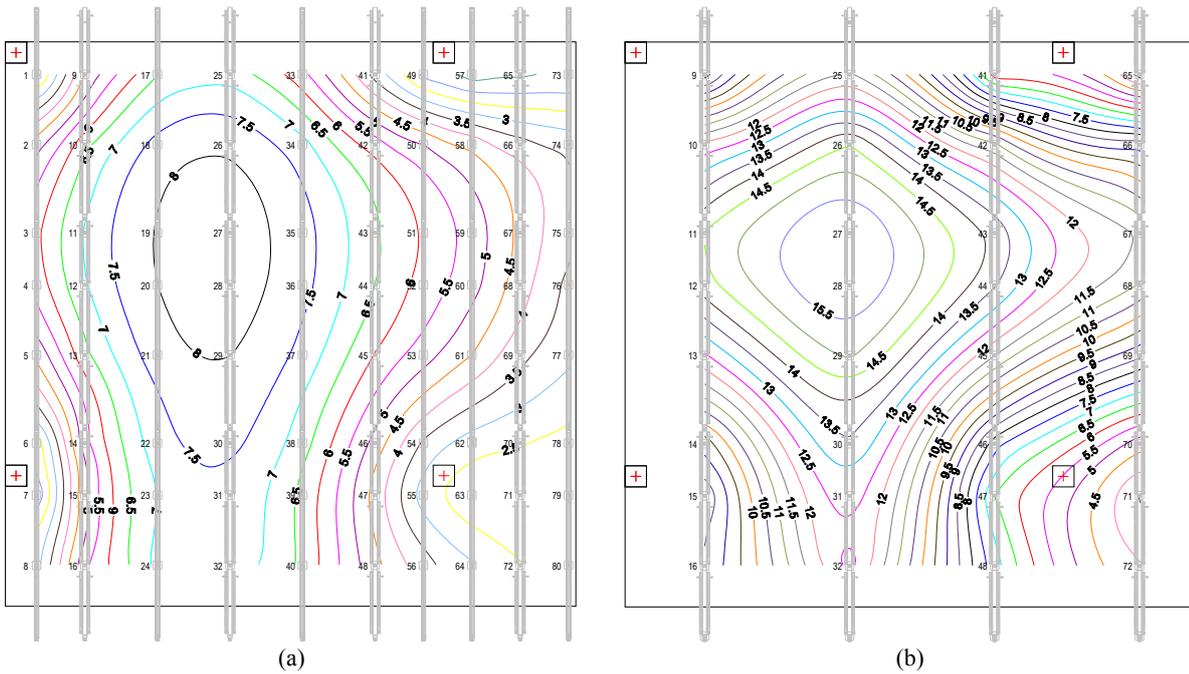


Fig. 5.54 Distribución de cargas en puntales del forjado 3. Carga en el forjado 3. (a) Proceso de CD (b) Proceso de CCD (kN)

### 5.5.6. Paso de carga 6 (Descimbrado del forjado 2)

Las figuras 5.55 y 5.56 muestran los resultados del modelo de EF para el descimbrado del forjado 2, considerado un proceso de CD y un proceso de CCD, respectivamente.

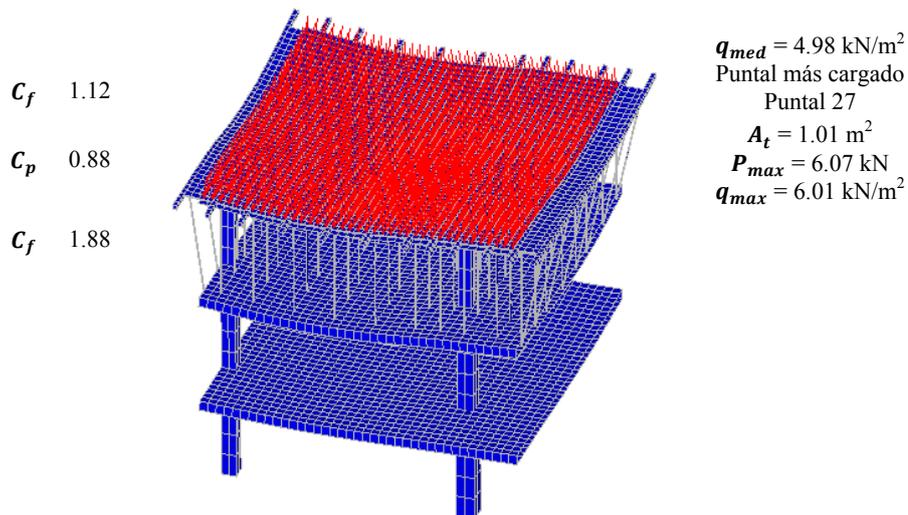


Fig. 5.55 Resultados del proceso de CD. Paso de carga 6 (Descimbrado del forjado 2)

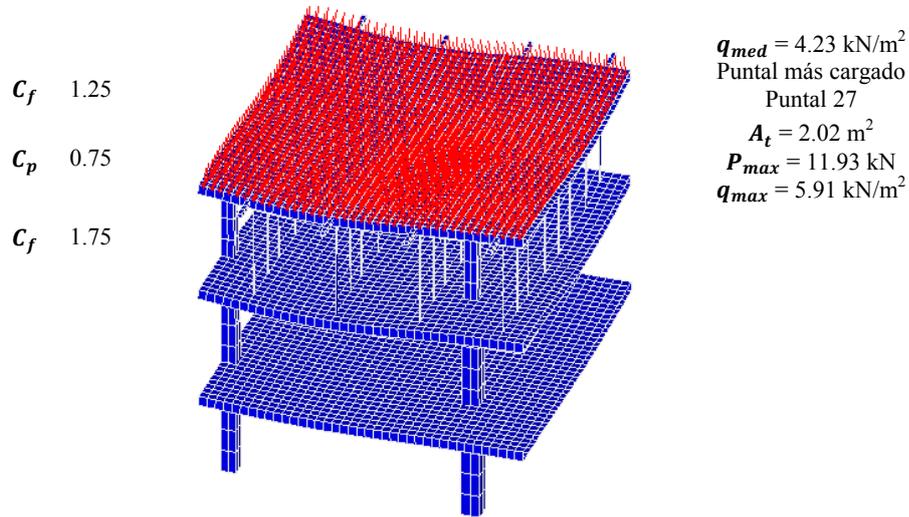


Fig. 5.56 Resultados del proceso de CCD. Paso de carga 9 (Descimbrado del forjado 2)

La carga media en los puntales del forjado 3 es un 17% superior para el proceso de CD respecto al proceso de CCD. Esto contrasta con que el valor de la carga máxima, que es mayor en el proceso de CCD. Esta carga es 1.97 veces la carga máxima del proceso de CD.

En la figura 5.57 se muestra las cargas en los puntales del forjado 2 para los dos procesos constructivos considerados.

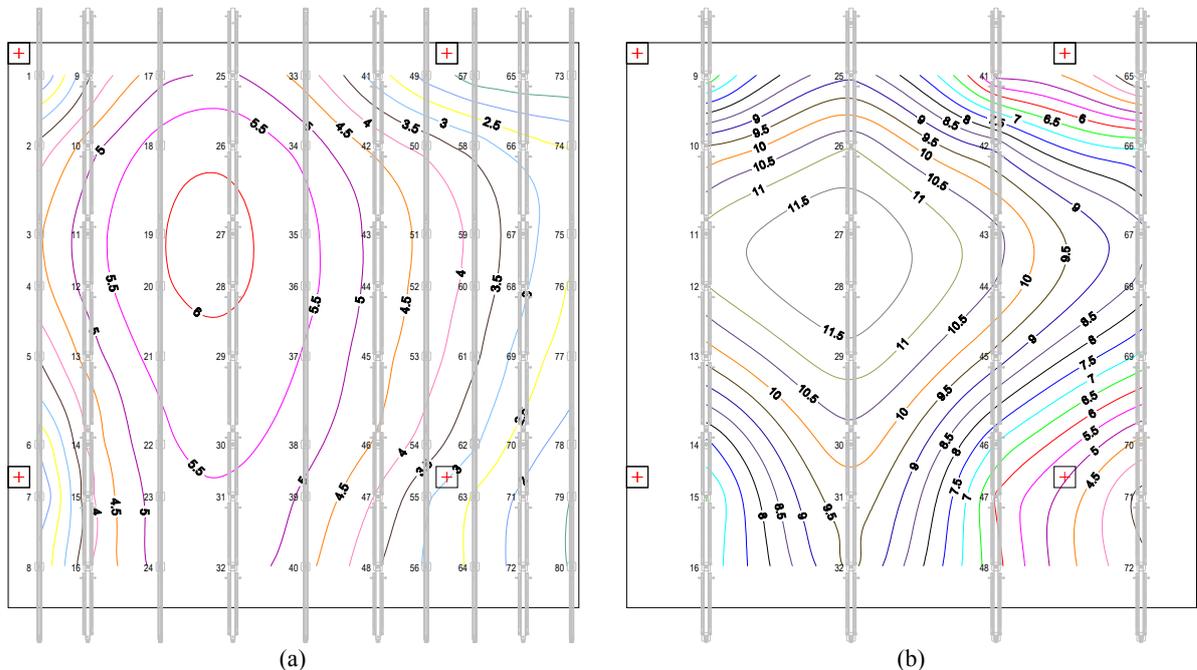


Fig. 5.57 Distribución de cargas en puntales del forjado 3 Descimbrado del forjado 2. (a) Proceso de CD (b) Proceso de CCD (kN)

### 5.5.7. Resumen de la comparación entre el proceso de CD, y el proceso de CCD.

De la Figura 5.58 a la Figura 5.63 se muestran los coeficientes de carga para forjados y puntales del modelo de EF de cimbrado y descimbrado y del modelo de EF de cimbrado, clareado y descimbrado.

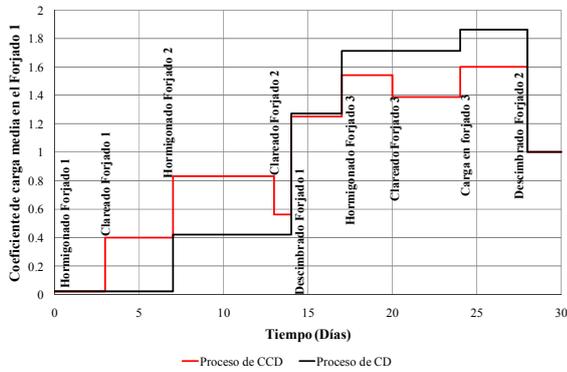


Fig. 5.58 Coeficientes de carga media del forjado 1

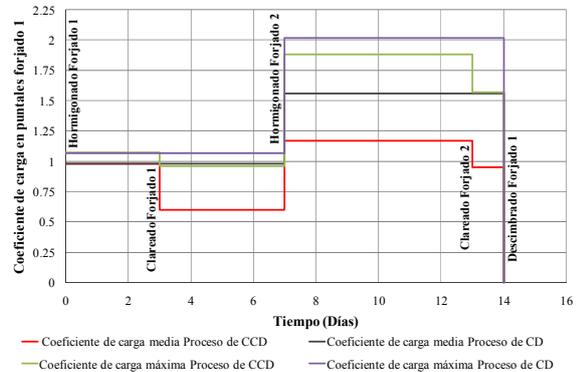


Fig. 5.59 Coeficientes de carga en puntales bajo el forjado 1

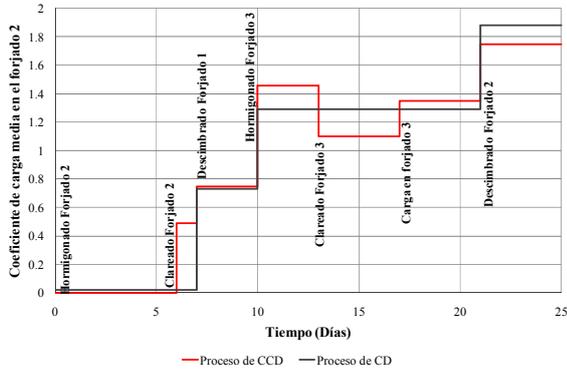


Fig. 5.60 Coeficientes de carga media del forjado 2

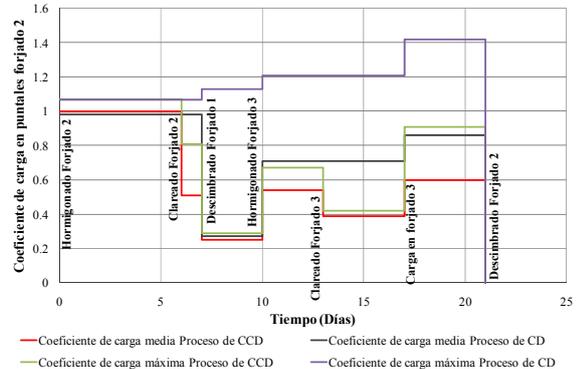


Fig. 5.61 Coeficientes de carga en puntales bajo el forjado 2

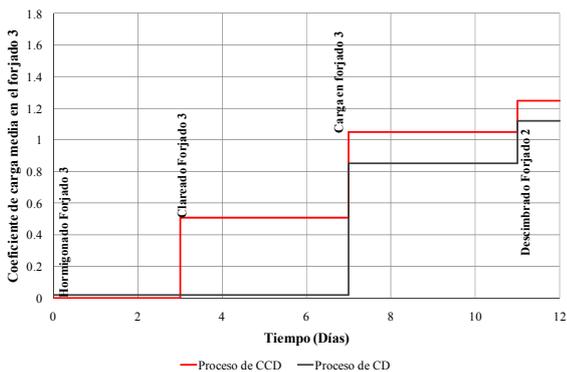


Fig. 5.62 Coeficientes de carga media del forjado 3

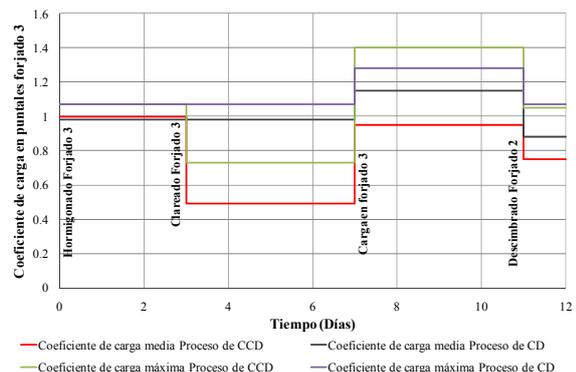


Fig. 5.63 Coeficientes de carga en puntales bajo el forjado 3

De la comparación del proceso de CCD con el proceso de CD se concluye:

- La ubicación de la carga máxima para los forjados se presenta, para los dos procesos constructivos, en el forjado 2 en el momento de su descimbrado. Dicha carga máxima, que

asume el forjado 2, es mayor en el proceso de CD, siendo la relación  $C_{f,max,CCD}/C_{f,max,CD}$  igual a 0.93.

- La carga media máxima en puntales por unidad de superficie se presenta en los puntales del forjado 1 para los dos procesos constructivos en el momento del hormigonado del forjado 2. Dicha carga es mayor en los puntales para el proceso de cimbrado y descimbrado ( $q_{med,max,CCD}/q_{med,max,CD} = 0.75$ ).
- El coeficiente de carga máxima en puntales, en los dos procesos constructivos, se presenta en los puntales del forjado 1 al hormigonar el forjado 2. Aunque el coeficiente de carga máxima es mayor para el proceso de CD, el área tributaria de los puntales en el proceso de CCD es del orden del doble del área tributaria en el proceso de CD. Razón que justifica cargas más altas en los puntales en un proceso de cimbrado, clareado y descimbrado ( $P_{max,CCD}/P_{max,CD} = 1.86$ ).

## 5.6. Comparación del proceso de CCD con un proceso de CRD

En el presente apartado se comparan los resultados de los modelos de EF para un proceso de CCD y un proceso de CRD. Las características de la estructura son las que se describen en el Capítulo 3, y el modelo de EF se muestra en la Figura 5.4. Las fases o pasos de carga del proceso de CCD se describen en el apartado 5.3. La evolución de las propiedades de los materiales son las desarrolladas en el Apéndice V aplicando la técnica de la madurez.

Para el proceso de CRD las fases o pasos de carga son las siguientes:

- a. Paso de carga 1 (Hormigonado del forjado 1) (0 días). El cálculo de este paso de carga consistió en desactivar los elementos de los forjados superiores, incluida su estructura temporal (puntales, sopandas y encofrado), dejando solo activados los elementos del forjado 1 con su sistema de cimbrado (véase Figura 5.64 (a)).
- b. Paso de carga 2 (Recimbrado del forjado 1) (5 días). Este paso de carga se dividió en dos partes. En la primera parte se desactivaron los puntales, sopandas y encofrado que soportan el forjado 1. De esta forma el forjado 1 asume completamente su peso propio. La segunda parte de este paso de carga consistió en reactivar los puntales bajo el forjado 1 (véase Figura 5.64 (b)).
- c. Paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2) (7 días). En este paso de carga se activaron el conjunto de elementos del forjado 2 incluidos pilares, encofrado, sopandas y puntales (véase Figura 5.64 (c)).
- d. Paso de carga 4 (Recimbrado del forjado 2) (13 días). El recimbrado del forjado 2 se simuló en dos partes. En la primera se desactivaron los puntales, sopandas y encofrado bajo el forjado 2. La segunda parte consistió en reactivar los puntales bajo el forjado 2. Así, dichos puntales, al final de este paso de carga, no se encuentran sometidos a ningún valor de carga (véase Figura 5.64 (d)).
- e. Paso de carga 5 (Descimbrado del forjado 1) (14 días). Se desactivaron los puntales bajo el forjado 1, quedando activos los puntales bajo el forjado 2 (véase Figura 5.64 (e)).
- f. Paso de carga 6 (Hormigonado del forjado 3) (17 días). Para este paso de carga se activaron la estructura temporal (puntales, sopandas y encofrado), los pilares y los elementos que forman el forjado 3 (véase Figura 5.64 (f)).

- g. Paso de carga 7 (Recimbrado del forjado 3) (22 días). En una primera parte se desactivaron los puntales, sopandas y encofrado del forjado 3 (de esta forma el forjado 3 asumió su peso propio). Posteriormente se activaron los puntales bajo el forjado 3 (véase Figura 5.64 (g)).
- h. Paso de carga 8 (Carga en el forjado 3) (24 días). Se aplicó una carga uniforme, simulando el peso de otro forjado de las mismas características, sobre los elementos del forjado 3 (véase Figura 5.64 (h)).
- i. Paso de carga 9 (Descimbrado del forjado 2) (25 días). El último paso de carga consistió en desactivar los puntales bajo el 2 (véase Figura 5.64 (i)).

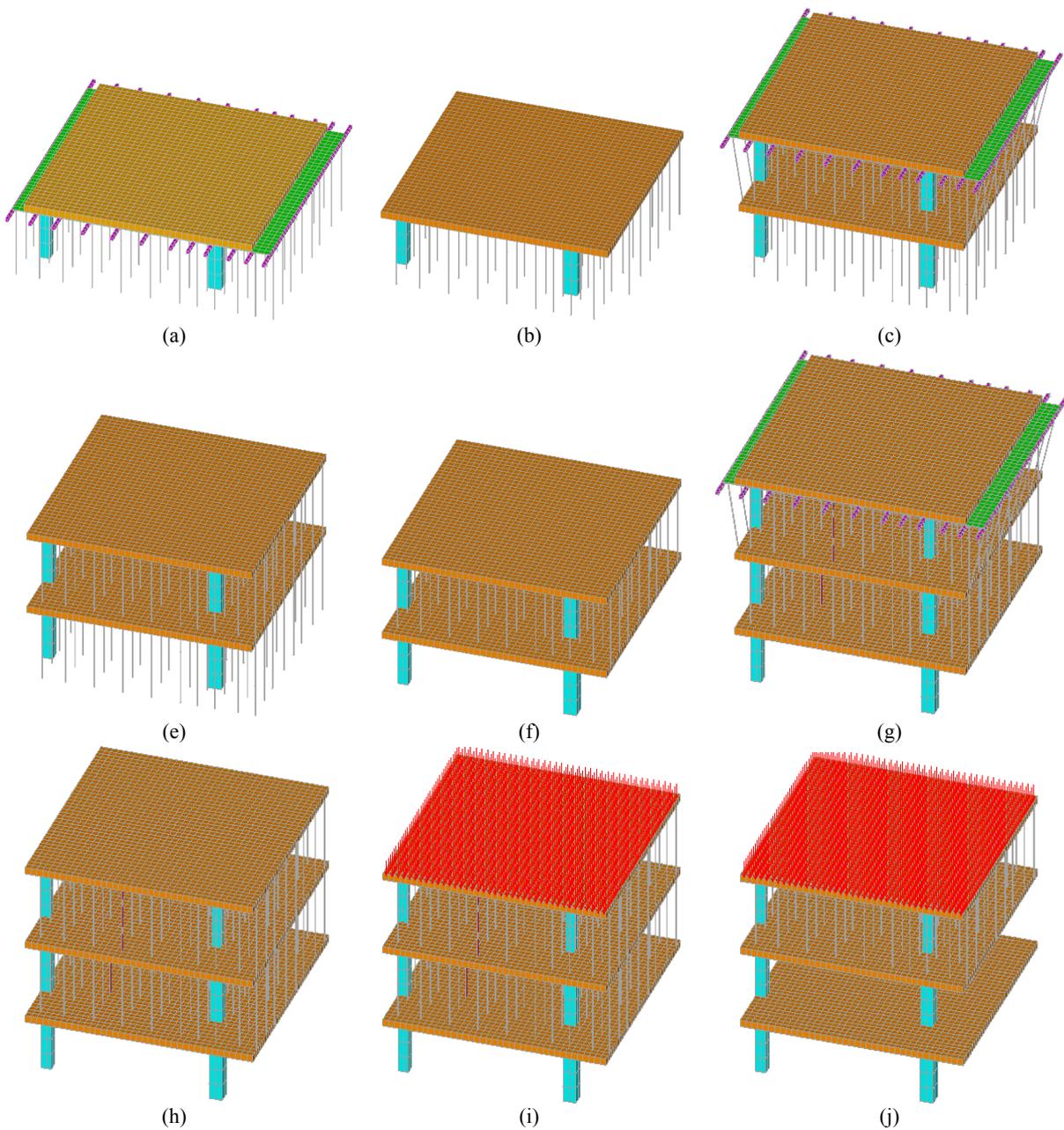


Fig. 5.64 Pasos de carga del modelo de EF para el proceso de CRD

El número de días para realizar cada una de las operaciones de construcción coincide para las fases en común de ambos procesos. La edad de recimbrado se ha establecido según el procedimiento desarrollado en el apartado 3.2 de la presente Tesis Doctoral. En dicho apartado se establece que el forjado, objeto de este estudio, para una temperatura media en obra de 10°C es capaz de asumir su peso propio y la sobrecarga de construcción a una edad de 5 días. Para cada una de las fases de construcción afines se evalúan las cargas medias, máximas y su distribución en el conjunto de puntales. La equivalencia entre los pasos de carga del proceso de CRD y el proceso de CCD es la siguiente:

- ✓ Paso de carga 1 (Hormigonado del forjado 1) del proceso de CRD con el paso de carga 1 (Hormigonado del forjado 1) del proceso de CCD.
- ✓ Paso de carga 2 (Recimbrado del forjado 1) del proceso de CRD con el paso de carga 2 (Clareado del forjado 1) del proceso de CCD.
- ✓ Paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2) del proceso de CRD con el paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2) del proceso de CCD.
- ✓ Paso de carga 4 (Recimbrado del forjado 2) del proceso de CRD con el paso de carga 4 (Clareado del forjado 2) del proceso de CCD.
- ✓ Paso de carga 5 (Descimbrado del forjado 1) del proceso de CRD con el paso de carga 5 (Descimbrado del forjado 1) del proceso de CCD.
- ✓ Paso de carga 6 (Hormigonado del forjado 3) del proceso de CRD con el paso de carga 6 (Hormigonado del forjado 3) del proceso de CCD.
- ✓ Paso de carga 7 (Recimbrado del forjado 3) del proceso de CRD con el paso de carga 7 (Clareado del forjado 3) del proceso de CCD.
- ✓ Paso de carga 8 (Carga en el forjado 3) del proceso de CRD con el paso de carga 8 (Carga en el forjado 3) del proceso de CCD.
- ✓ Paso de carga 9 (Descimbrado del forjado 2) del proceso de CRD con el paso de carga 9 (Descimbrado del forjado 2) del proceso de CCD.

### 5.6.1. Paso de carga 1 (Hormigonado del forjado 1)

Los resultados de este paso de carga para los dos procesos constructivos analizados son idénticos. La Figura 5.65 muestra un resumen de los resultados de los modelos de EF.

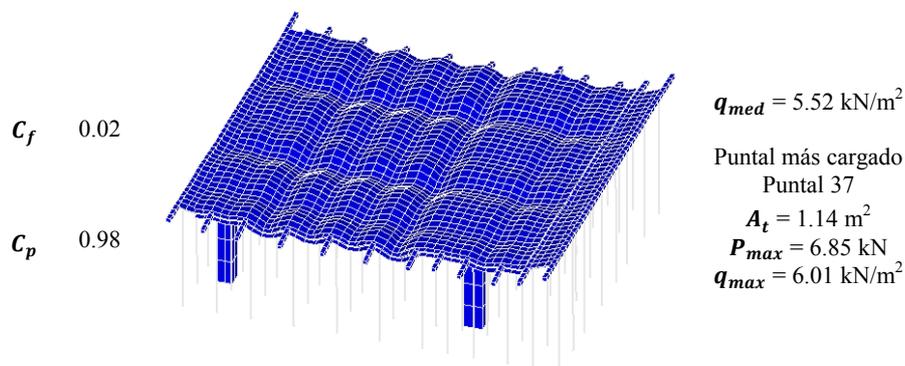


Fig. 5.65 Resultados proceso de CRD, y proceso de CCD. Paso de carga 1 (Hormigonado del forjado 1)

La Figura 5.66 muestra la distribución de cargas en los puntales del forjado 1.

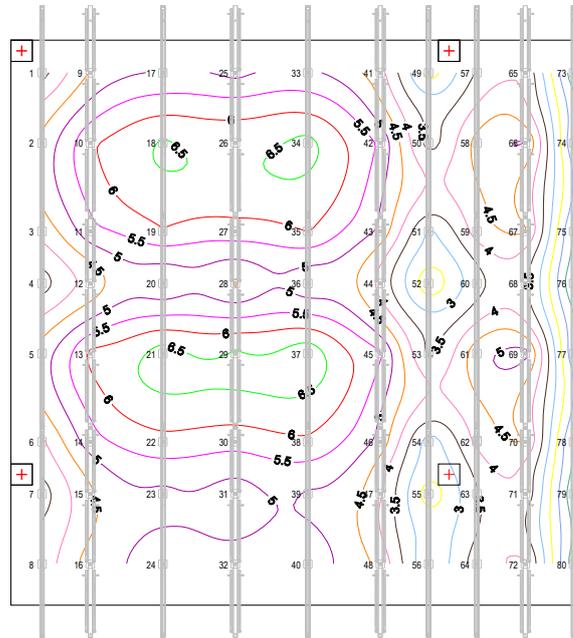


Fig. 5.66 Distribución de cargas en puntales del forjado 1 Hormigonado del forjado 1. Proceso de CRD y proceso de CCD (kN)

### 5.6.2. Paso de carga 2 (Recimbrado del forjado 1)

En el recimbrado del forjado 1 se desactivaron los puntales, sopandas y encofrado, permitiéndole a éste asumir su peso propio. Esta fase se compara con el clareado del forjado 1 en el proceso de CCD. Las Figuras 5.67 y 5.68 muestran un resumen de los resultados de los modelos de EF.

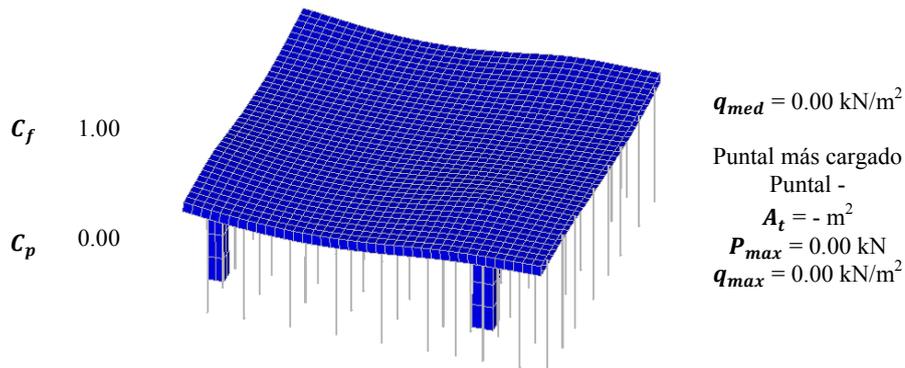


Fig. 5.67 Resultados proceso de CRD. Paso de carga 2 (Recimbrado del forjado 1)

Los puntales del forjado 1 una vez recimbrado el forjado 1 se encuentran descargados. En el proceso de clareado se desactivan sopandas, puntales intermedios y tableros de encofrado, dejando activos los puntales de las sopandas principales. Así, cada uno de los puntales que permanecen, una vez clareado el forjado, asumen más carga. Dicha carga es inferior a la que el conjunto de puntales asumía mientras el forjado se encontraba clareado. La Figura 5.17 (b) muestra la distribución de cargas en puntales una vez clareado el forjado.

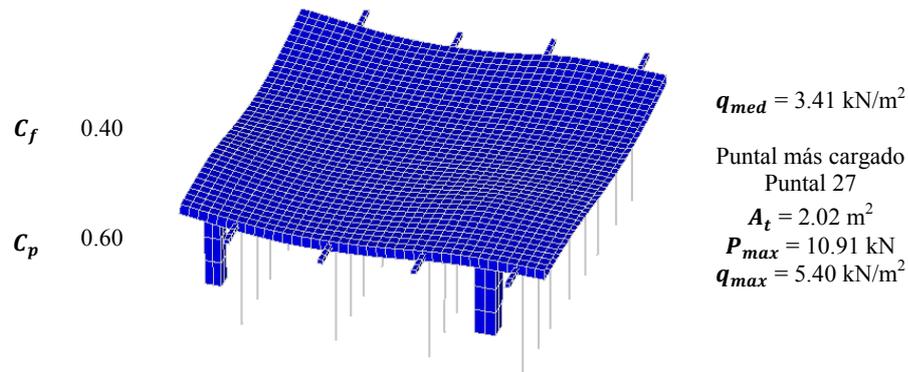


Fig. 5.68 Resultados proceso de CCD. Paso de carga 2 (Clareado del forjado 1)

### 5.6.3. Paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2)

Las Figuras 5.69 y 5.70 muestran un resumen de los resultados del modelo de CRD y del modelo de CCD respectivamente.

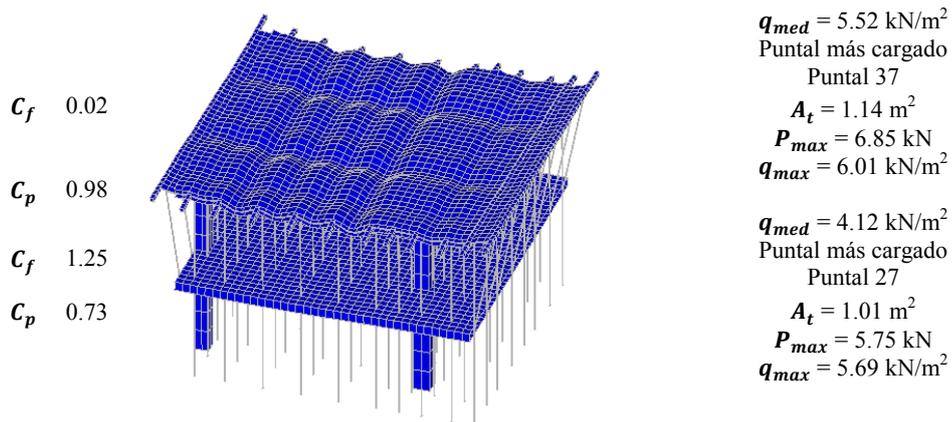


Fig. 5.69 Resultados del proceso de CRD. Paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2)

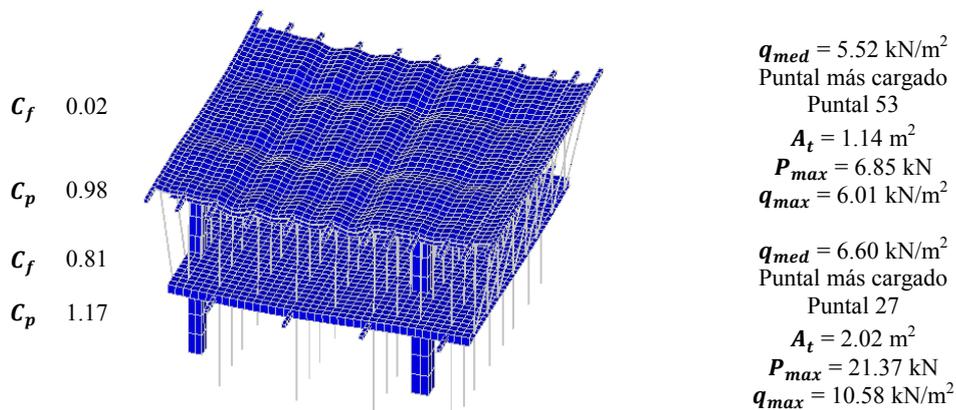


Fig. 5.70 Resultados del proceso de CCD. Paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2)

Tal y como era de esperar de comparar los resultados de los dos procesos constructivos el forjado 1 asume más carga en el proceso de CRD. En este proceso, el forjado asume un 54% más de carga

respecto a la que asume en un proceso de CCD. Consecuentemente los puntales bajo el forjado 1 asumen más carga en el proceso de CCD. Así, la carga máxima de los puntales del forjado 1, en el proceso que incluye el clareado, es del orden de 3.72 veces la carga máxima en el proceso que incluye el recimbrado.

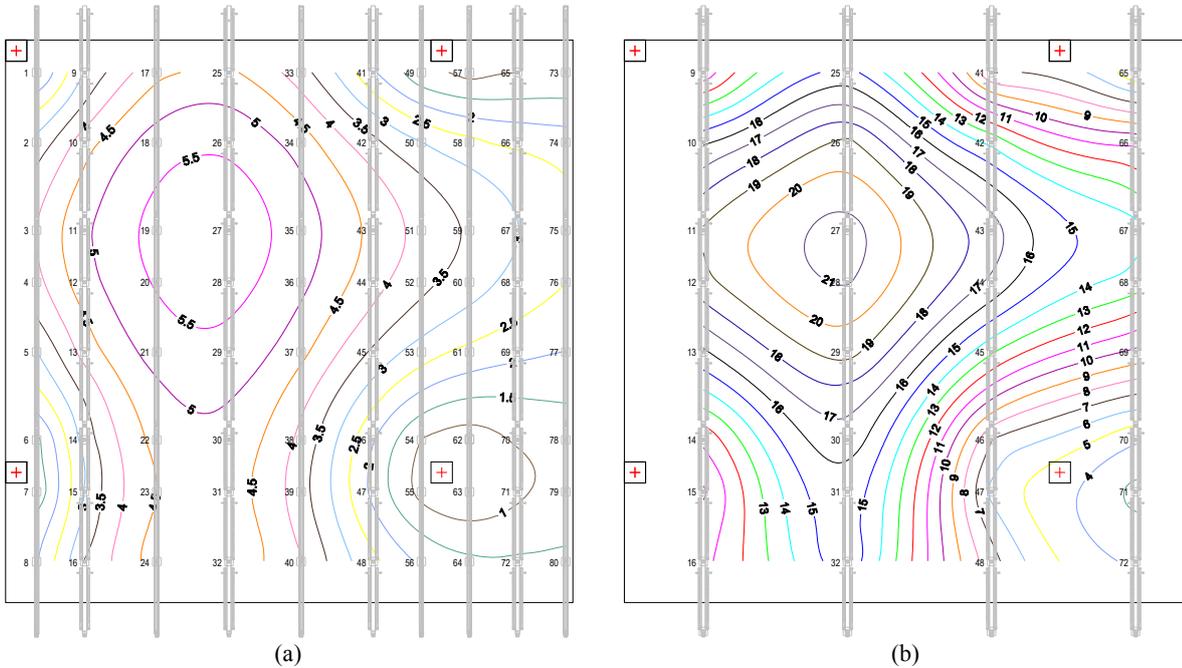


Fig. 5.71 Distribución de cargas en puntales del forjado 1 Hormigonado del forjado 2. (a) Proceso de CRD (b) Proceso de CCD (kN)

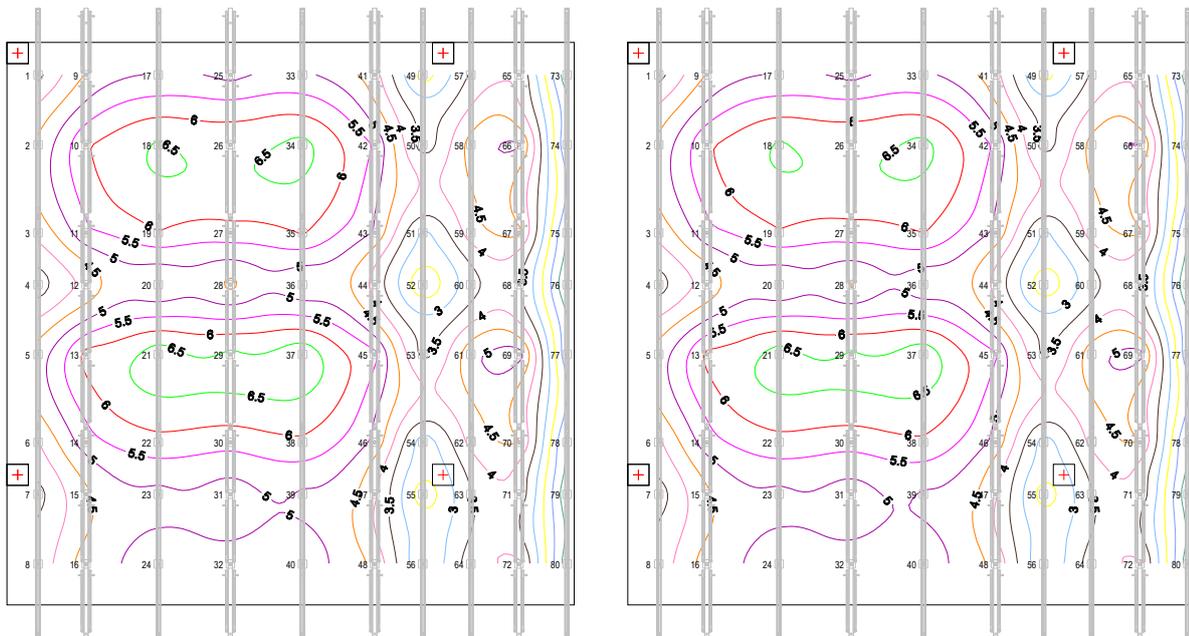


Fig. 5.72 Distribución de cargas en puntales del forjado 2 Hormigonado del forjado 2. (a) Proceso de CRD (b) Proceso de CCD (kN)

La Figura 5.71 muestra una comparación de la distribución de las cargas en puntales del forjado 1 para los dos procesos analizados. La distribución de cargas en los puntales del forjado 2 es muy similar para los dos procesos y se muestra en la Figura 5.72.

#### 5.6.4. Paso de carga 4 (Recimbrado del forjado 2)

Al recimbrar el forjado 2, los forjados 1 y 2 asumen completamente su peso propio. La Figura 5.73 muestra un resumen de los resultados, del modelo de EF, una vez recimbrado el forjado 2. Este proceso de recimbrado se compara con el clareado del segundo forjado dentro del proceso de CCD. La Figura 5.74 muestra un resumen de los resultados obtenidos al clarear el forjado 2.

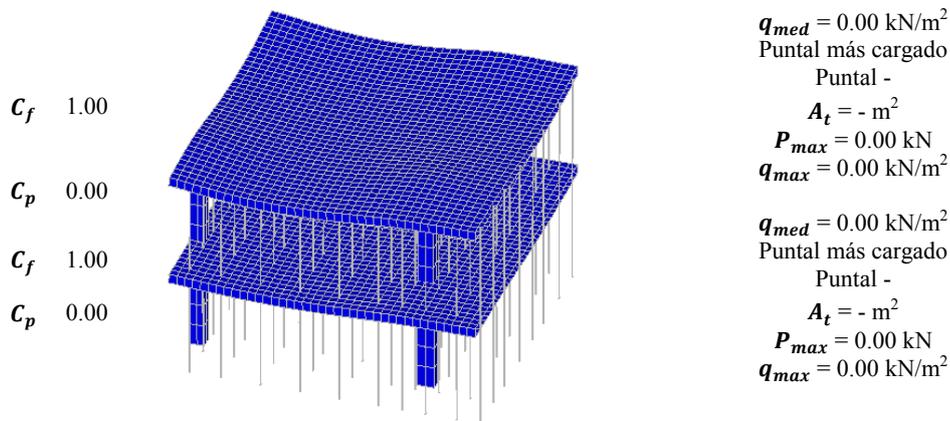


Fig. 5.73 Resultados del proceso de CRD. Paso de carga 4 (Recimbrado del forjado 2)

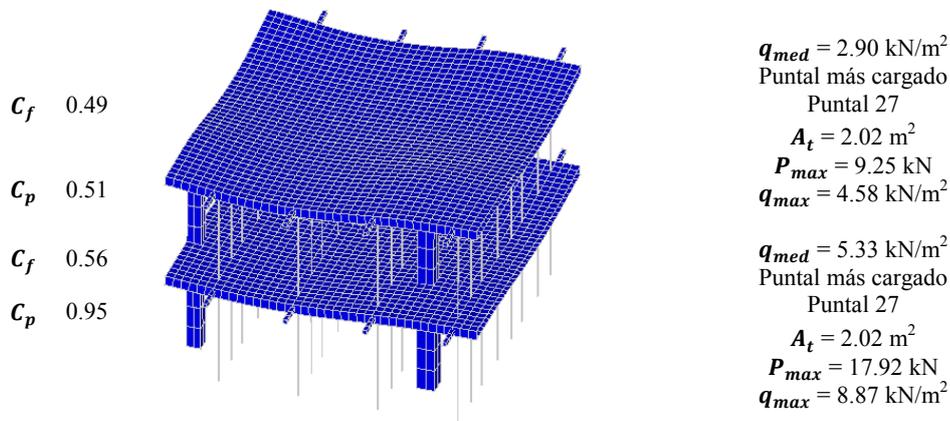


Fig. 5.74 Resultados del proceso de CCD. Paso de carga 4 (Clareado del forjado 2)

A diferencia del proceso de CRD, donde los forjados asumen su peso propio, en el proceso de CCD los forjados asumen aproximadamente el 50% de su peso propio para los pasos de carga considerados (recimbrado y clareado del forjado 2). Los puntales de los forjados 1 y 2 en el proceso de CRD se encuentran descargados. No ocurre lo mismo en los puntales de los forjados 1 y 2 en el proceso de CCD que si se encuentran sometidos a carga. La distribución de dicha carga en los puntales de ambos forjados se muestra en las Figuras 5.22 (b) y 5.23 (b).

### 5.6.5. Paso de carga 5 (Descimbrado del forjado 1)

Al retirar los puntales de forjado 1, en el proceso de CRD, no hay cambios en las cargas asumidas por los forjados 1 y 2 ni en los puntales del forjado 2. Esto debido a que los puntales retirados no tenían carga alguna. La Figura 5.75 muestra un resumen de los resultados del modelo de EF para el proceso de CRD al retirar los puntales del forjado 1.

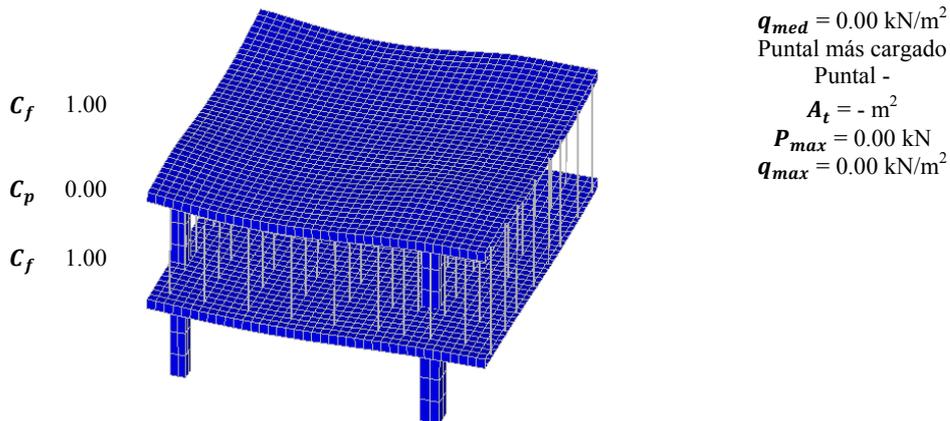


Fig. 5.75 Resultados del proceso de CRD. Paso de carga 5 (Descimbrado del forjado 1)

En el proceso de CCD al retirar los puntales del forjado 1 la carga que estos asumían se reparte entre los forjados 1 y 2. La Figura 5.76 muestra un resumen de los resultados del modelo de EF al descimbrar el forjado dentro del proceso de CCD. La distribución de cargas en los puntales del forjado 2 se muestra en la Figura 5.25 (b).

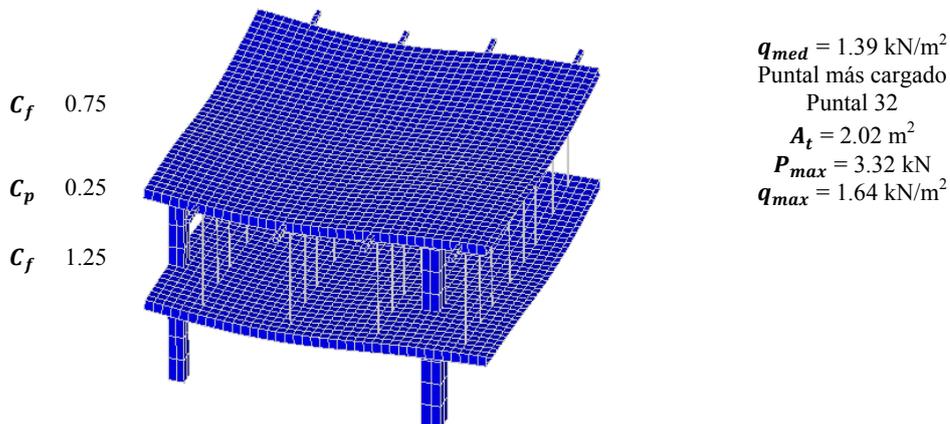


Fig. 5.76 Resultados del proceso de CCD. Paso de carga 5 (Descimbrado del forjado 1)

### 5.6.6. Paso de carga 6 (Hormigonado del forjado 3)

Las Figuras 5.77 y 5.78 muestran los resultados de los modelos de EF para el proceso de CRD y el proceso de CCD, respectivamente.

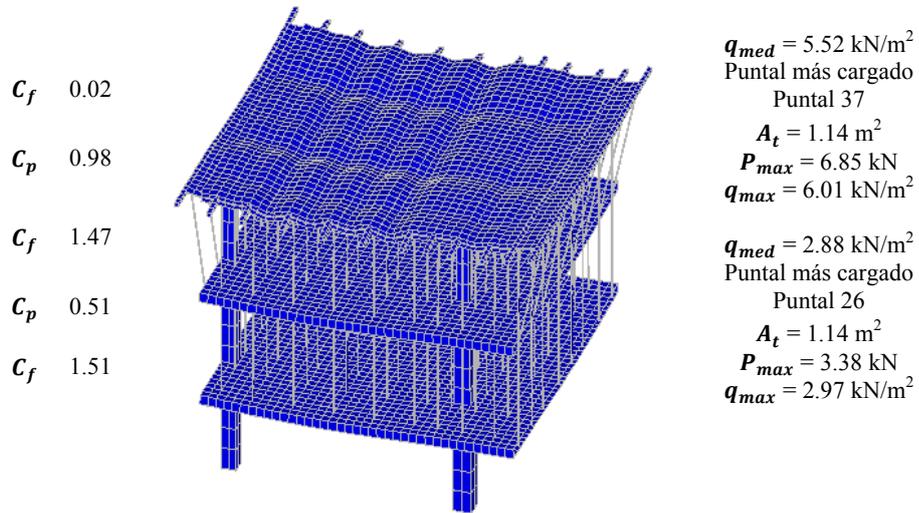


Fig. 5.77 Resultados del proceso de CRD. Paso de carga 6 (Hormigonado del forjado 3)

Las cargas en los puntales del forjado 3 son muy similares para los dos procesos constructivos estudiados (véase figura 5.80). En el forjado 2, la carga media por unidad de superficie de los puntales es muy similar para los dos procesos. La carga media por unidad de superficie de los puntales del forjado 2, en el proceso de CCD, es solo un 6% mayor a la del proceso de CRD.

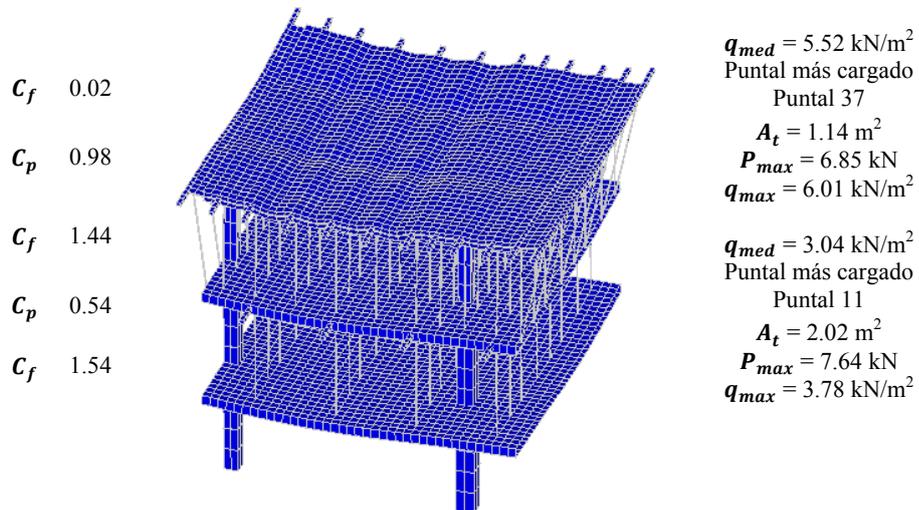


Fig. 5.78 Resultados del proceso de CCD. Paso de carga 6 (Hormigonado del forjado 3)

En la Figura 5.79 se muestra una comparación de la distribución de cargas en los puntales del forjado 2 para los dos procesos analizados. La carga máxima del proceso de CCD es 2.26 veces la carga máxima del proceso de CRD.

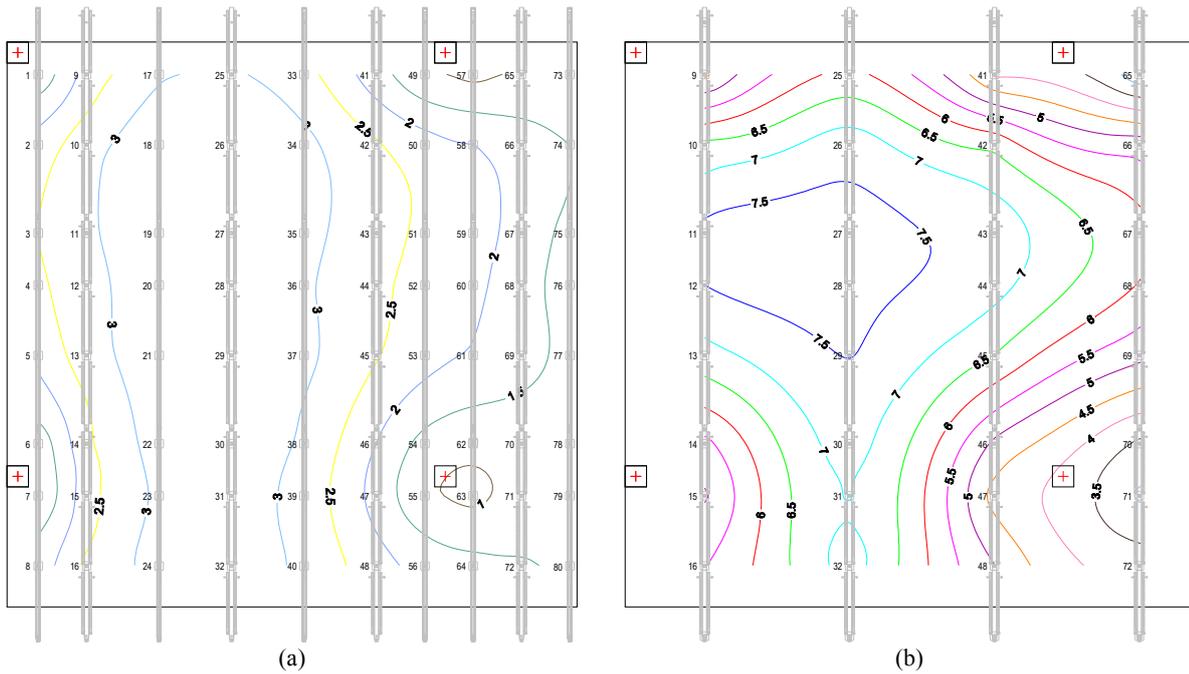


Fig. 5.79 Distribución de cargas en puntales del forjado 2. Hormigonado del forjado 3. (a) Proceso de CRD (b) Proceso de CCD (kN)

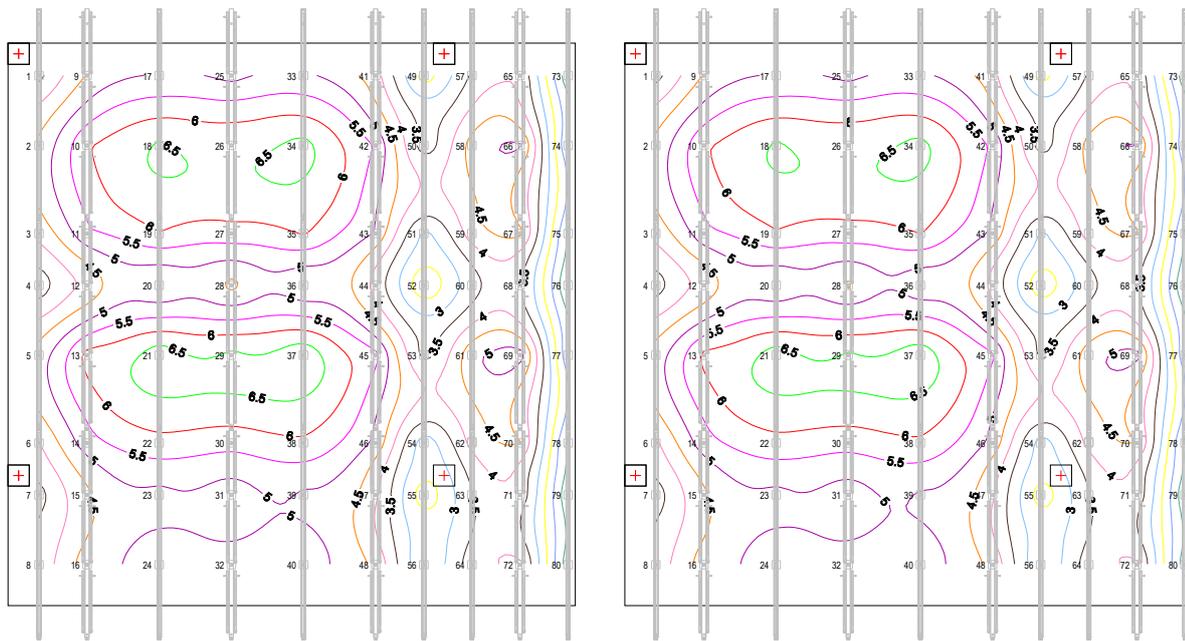


Fig. 5.80 Distribución de cargas en puntales del forjado 3. Hormigonado del forjado 3. (a) Proceso de CRD (b) Proceso de CCD (kN)

### 5.6.7. Paso de carga 7 (Recimbrado del forjado 3)

En el este apartado se compara el recimbrado con el clareado del forjado 3. Las Figuras 5.81 y 5.82 muestran los resultados del modelo de EF para el proceso de CRD y para el proceso de CCD.

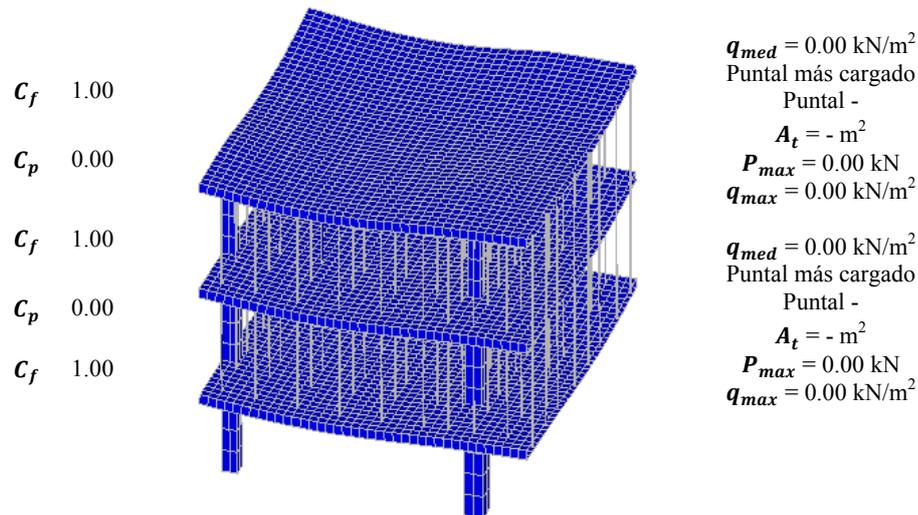


Fig. 5.81 Resultados del proceso de CRD. Paso de carga 7 (Recimbrado del forjado 3)

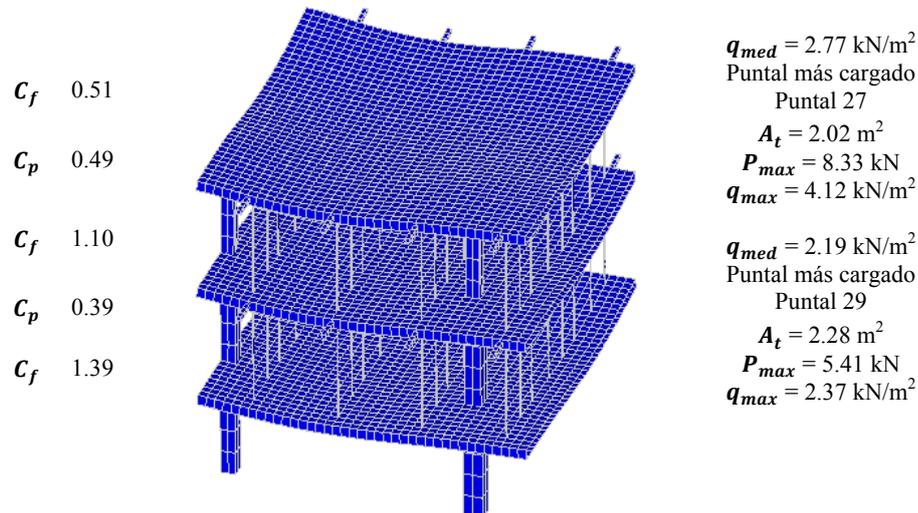


Fig. 5.82 Resultados del proceso de CCD. Paso de carga 7 (Clareado del forjado 3)

Al recimbrar el forjado 2, los puntales de los forjados 2 y 3 se descargan completamente, lo que lleva a que los tres forjados asuman cada uno su peso propio. En el proceso de CCD el forjado 3 asume el 51% de carga. El restante 49% se reparte entre los forjados inferiores. La distribución de cargas en los puntales de los forjados 2 y 3 se muestra en las Figuras 5.30 (b) y 5.31 (b) respectivamente.

### 5.6.8. Paso de carga 8 (Carga en el forjado 3)

Las Figuras 5.83 y 5.84 muestran un resumen de los resultados, al aplicar una carga en el forjado 3, del modelo de EF para el proceso de CRD y para el proceso de CCD, respectivamente.

En el proceso de CRD el 32% de la carga aplicada es asumida por el forjado 3, repartiendo el 68% restante en los forjados 1 y 2 (41% para el forjado 1 y 27% para el forjado 2). En el proceso de CCD el 54% de dicha carga es asumida por el forjado 3. Quedando el 21% y el 25% de esta carga para los forjados 1 y 2 respectivamente.

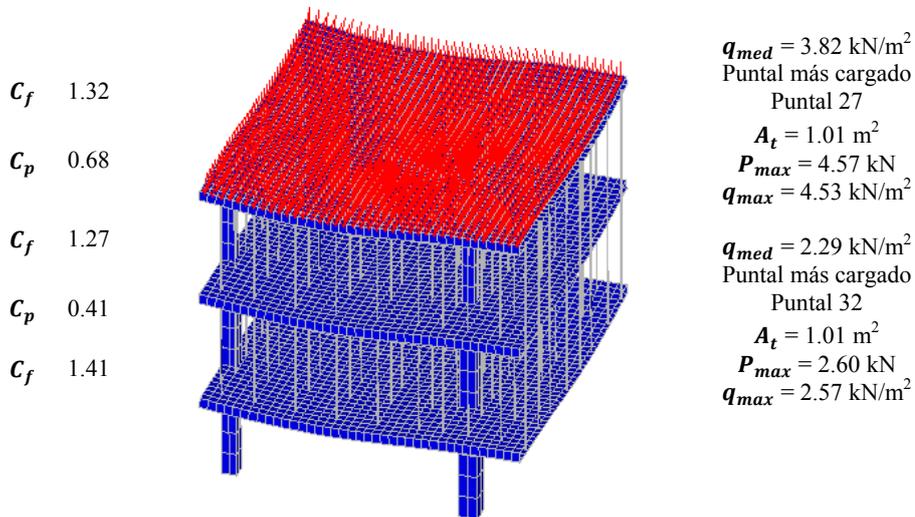


Fig. 5.83 Resultados del proceso de CRD. Paso de carga 8 (Carga en el forjado 3)

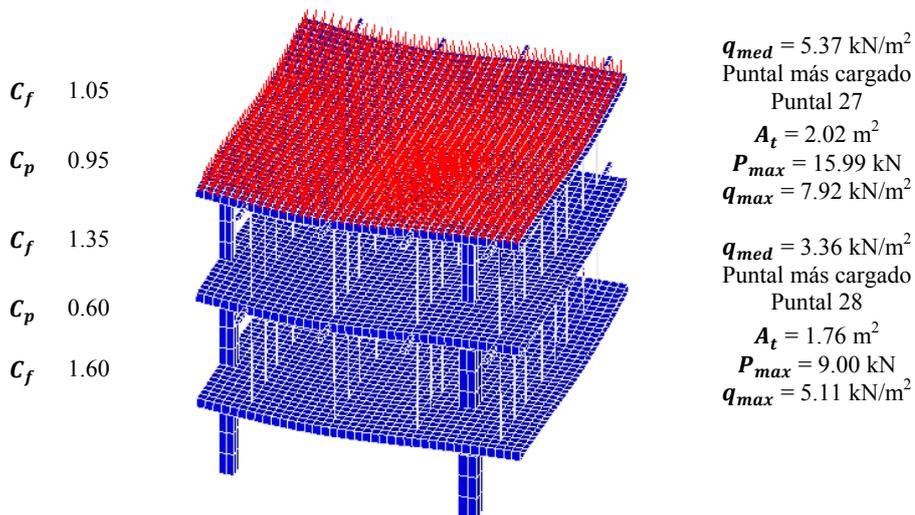


Fig. 5.84 Resultados del proceso de CCD. Paso de carga 8 (Carga en el forjado 3)

Las Figuras 5.85 y 5.86 muestran una comparación entre las distribuciones de carga en los puntales de los forjados 2 y 3 para los dos procesos constructivos analizados. En estas Figuras se evidencia que las cargas del proceso de CCD son muy superiores a las del proceso de CRD. Para los puntales del forjado 2 la carga máxima es 3.46 veces superior en el proceso que incluye el clareado de puntales. En el caso de los puntales del forjado 3 la carga máxima es 3.50 veces superior en el CCD.

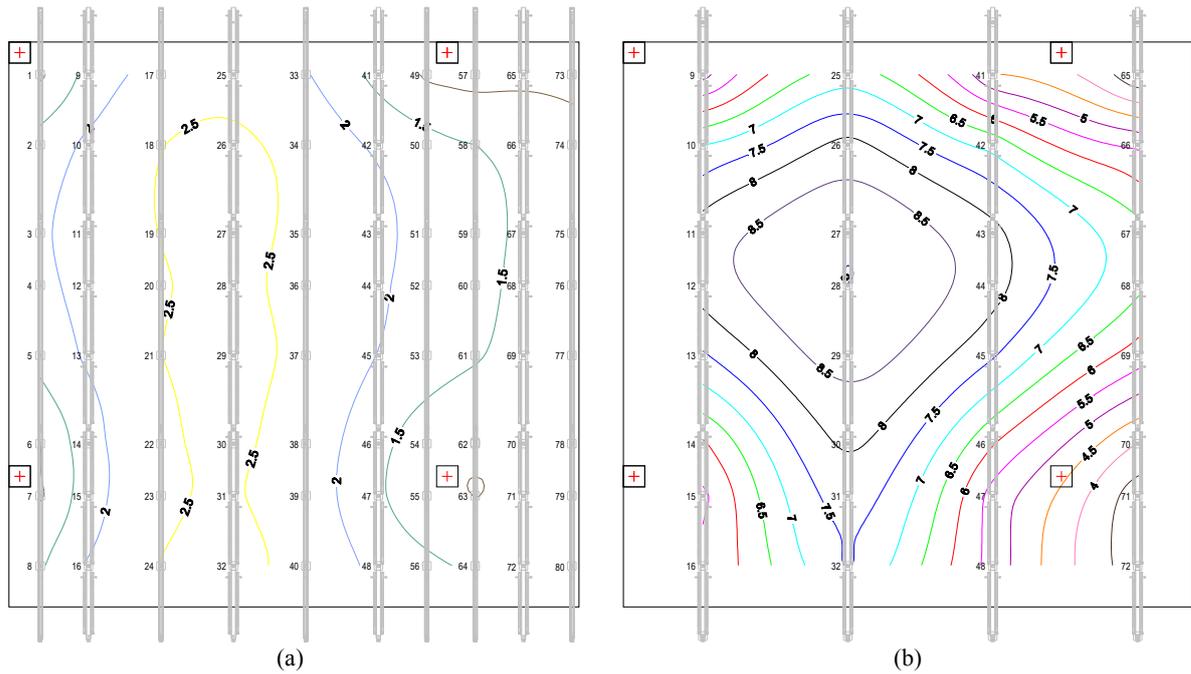


Fig. 5.85 Distribución de cargas en puntales del forjado 2. Carga en el forjado 3. (a) Proceso de CRD (b) Proceso de CCD (kN)

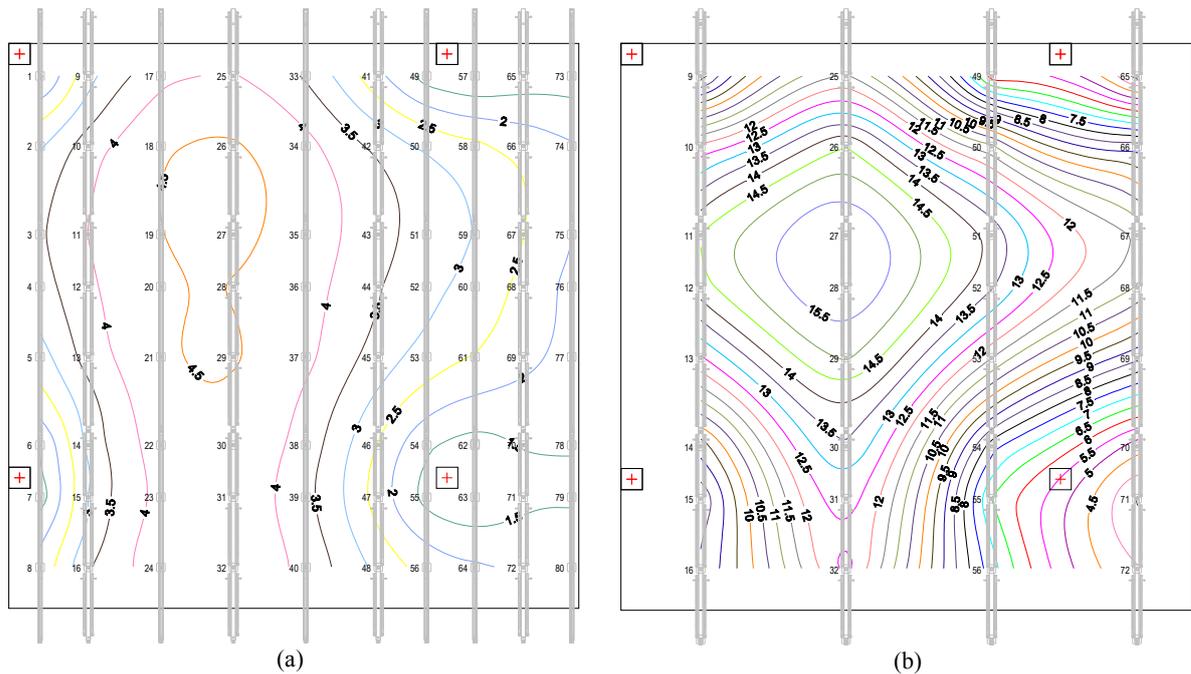


Fig. 5.86 Distribución de cargas en puntales del forjado 3. Carga en el forjado 3. (a) Proceso de CRD (b) Proceso de CCD (kN)

### 5.6.9. Paso de carga 9 (Descimbrado del forjado 2)

Las Figuras 5.87 y 5.88 muestran un resumen de los resultados de los modelos de EF para el proceso de CRD y el proceso de CCD.

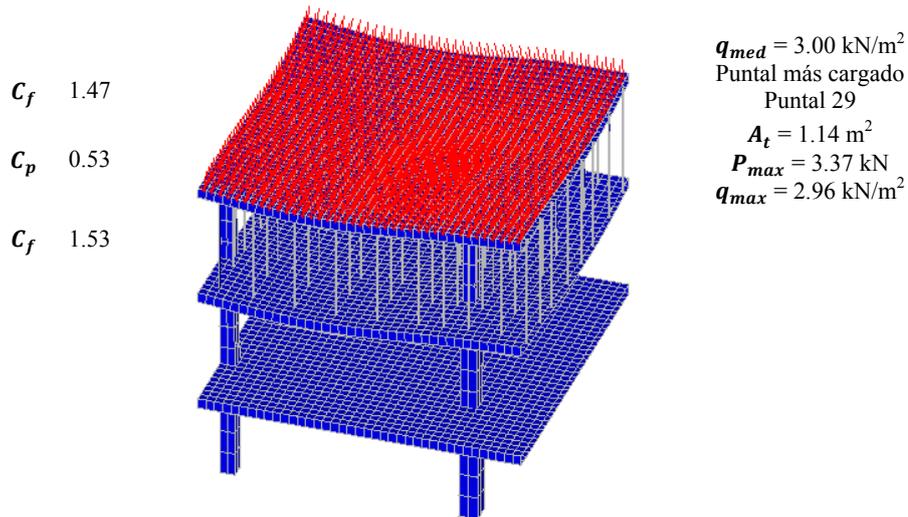


Fig. 5.87 Resultados del proceso de CRD. Paso de carga 9 (Descimbrado del forjado 2)

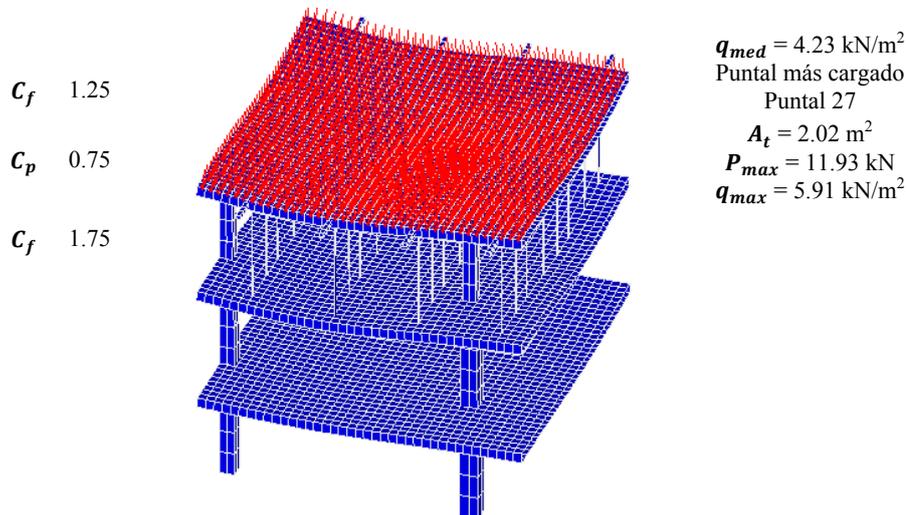


Fig. 5.88 Resultados del proceso de CCD. Paso de carga 9 (Descimbrado del forjado 2)

Los puntales del forjado 3, en el proceso de CCD, asumen más porcentaje de carga que en el proceso de CRD. Dicha carga es un 41% más alta con respecto a la carga del proceso que incluye el recimbrado. Así, el forjado 2 en el proceso de CCD asume el porcentaje de carga más alto para el paso de carga considerado. Esto contrasta con la carga que asume el forjado 3 en el proceso de CCD que es inferior a la carga que asume éste en el proceso de CRD.

La carga máxima en puntales es mayor para el proceso de CCD. Dicha carga es 3.54 veces la carga máxima de los puntales en el proceso de CRD. La Figura 5.89 compara la distribución de cargas para los dos procesos constructivos considerados.

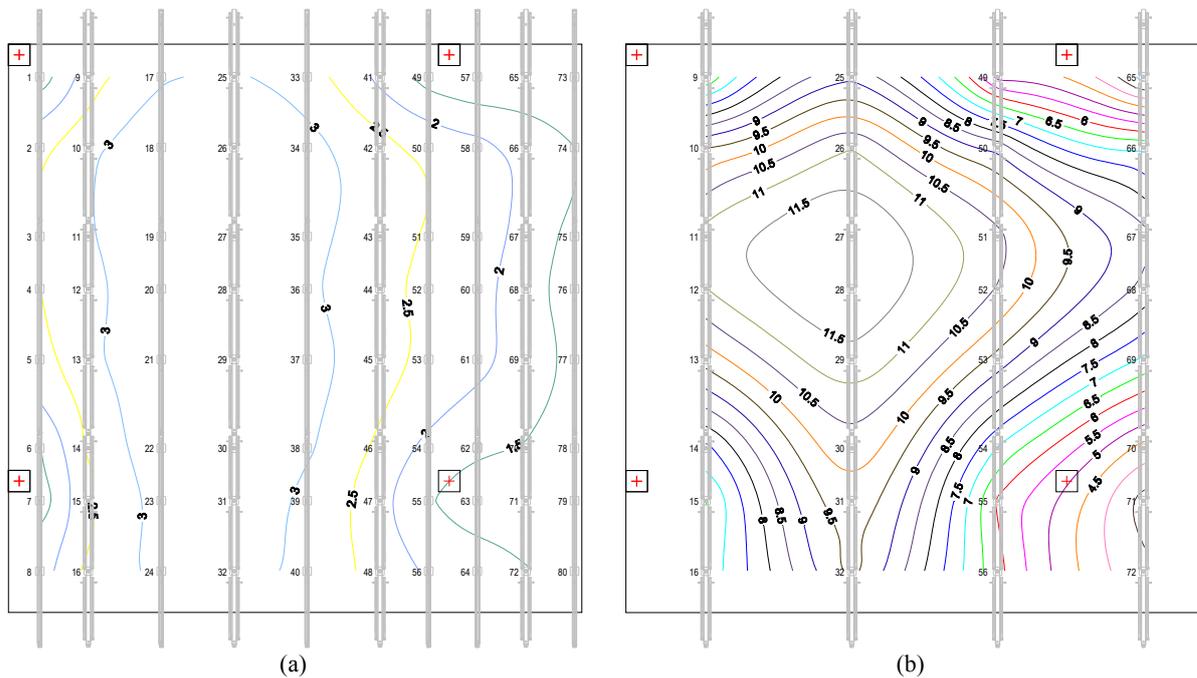


Fig. 5.89 Distribución de cargas en puntales del forjado 3. Descimbrado del forjado 2. (a) Proceso de CRD (b) Proceso de CCD (kN)

### 5.6.10. Resumen de la comparación entre el proceso de CRD y el proceso de CCD

De la Figura 5.90 a la Figura 5.95 se muestran los coeficientes de carga de puntales y forjados, para los procesos de construcción analizados en el presente apartado. De la comparación de proceso de CRD con el proceso de CCD se concluye:

- ✓ Los coeficientes de carga media para el proceso de CRD y para el proceso de CCD son máximos en el forjado 2. Para el proceso de CRD dicho coeficiente es de 1.53 y para el proceso de CCD de 1.74. Así, en el proceso de CCD se alcanza una mayor sollicitación de carga para el forjado. Sin embargo, en el proceso de CRD los tres forjados se ven sometidos, a edades cortas, a cargas más altas (su peso propio) que en el proceso de CCD (fracción de su peso propio).
- ✓ La carga media máxima por unidad de superficie en los puntales se presenta para el proceso de CCD en los puntales del forjado 1 al hormigonar el forjado 2. Dicha carga para el proceso de CRD es máxima en los puntales de los forjados una vez son hormigonados (en este proceso constructivo nunca se supera un coeficiente de 1.00 para los puntales). Así, es mayor la carga en los puntales para un proceso de CCD.
- ✓ El coeficiente de carga máxima en puntales es mayor para el proceso de CCD. Este coeficiente se presenta para dicho proceso en los puntales del forjado 1 al hormigonar el forjado 2. Para el proceso de CRD el coeficiente de carga máxima es mayor en los puntales de los forjados después de su hormigonado.
- ✓ Es evidente que los coeficientes de carga media y máxima del proceso de CRD resultan inferiores a los coeficientes del proceso de CCD. Esto es debido a la operación de recimbrado, donde los

forjados asumen su peso propio descargando los puntales que al reinstalarse contribuyen con los fututos incrementos de carga a los que se verá sometido el forjado.

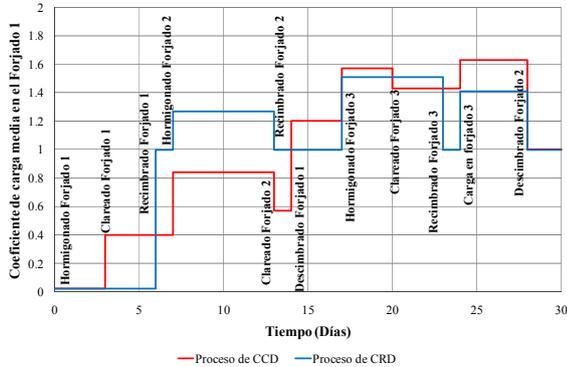


Fig. 5.90 Coeficientes de carga media del forjado 1

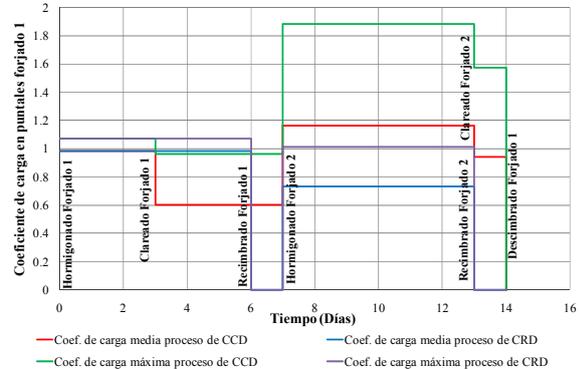


Fig. 5.91 Coeficientes de carga en puntales bajo el forjado 1

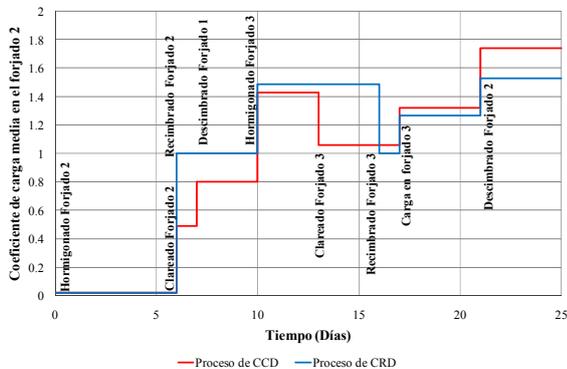


Fig. 5.92 Coeficientes de carga media del forjado 2

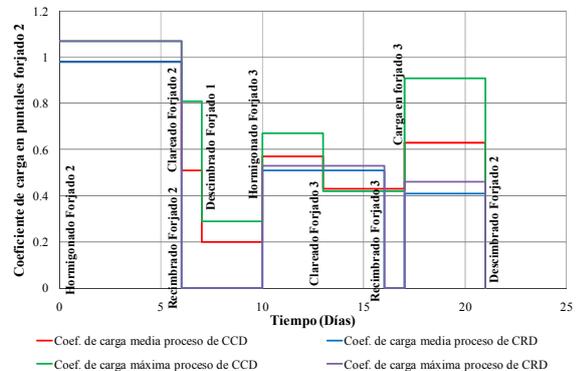


Fig. 5.93 Coeficientes de carga en puntales bajo el forjado 2

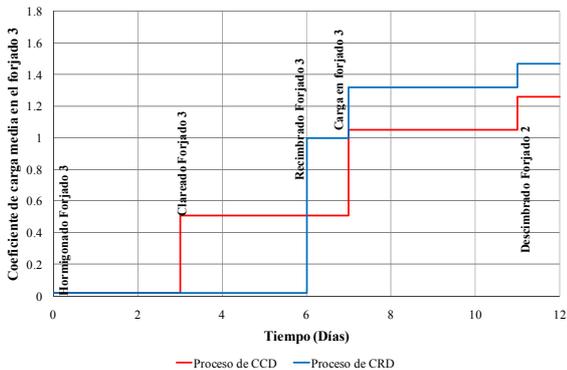


Fig. 5.94 Coeficientes de carga media del forjado 3

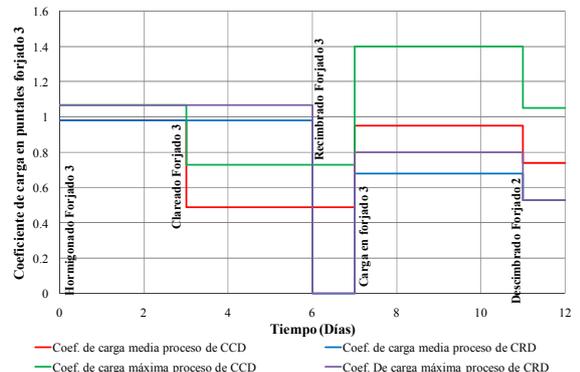


Fig. 5.95 Coeficientes de carga en puntales bajo el forjado 3

## 5.7. Conclusiones relativas al estudio por el método de los EF

En el presente Capítulo se ha desarrollado un estudio, por el método de los EF, para el cálculo de la transmisión de cargas entre forjados y puntales durante la construcción de edificios de forjados de hormigón in situ.

La verificación del modelo de EF se ha realizado a partir de las medidas experimentales instantáneas incluidas en el Capítulo 4 de la presente Tesis Doctoral. De la verificación del modelo de EF se concluye:

- ✓ El modelo de EF representa con una precisión adecuada la operación de clareado. La media de la relación entre la carga media de puntales medida experimentalmente y numéricamente ( $q_{med,exp}/q_{med,MEF}$ ) para el clareado de los tres forjados es de 1.01, con una desviación típica de 0.09.
- ✓ En general, el modelo de EF tiene un buen grado de ajuste respecto a las cargas medias medidas experimentalmente. La media de la relación  $q_{med,exp}/q_{med,MEF}$  de todas las fases de construcción es de 0.96, con una desviación típica de 0.15.
- ✓ Las mayores diferencias entre el modelo experimental y el modelo de EF se encuentran en la posición y en el valor de la carga máxima en puntales. La media de la relación  $P_{max,exp}/P_{max,MEF}$  del total de las fases de construcción es de 1.08, con una desviación típica de 0.25. Este error es debido a que en el modelo experimental resulta muy difícil controlar que todos los puntales se encuentran apretados de la misma forma. Así, si un puntal se encuentra más ajustado que los puntales que se encuentran a su lado, éste asumirá más carga. Por el contrario, si un puntal se encuentra menos apretado que los que se encuentran a su alrededor, estos asumirán mayor cantidad de carga.

Una vez verificada la validez del modelo numérico, se comparó el proceso de CCD con el proceso de CD, y con el proceso de CRD.

De la comparación del proceso de CCD con el proceso de CD se concluye:

- ✓ En el proceso de CD se presenta una mayor sollicitación de carga en los forjados 1 y 2 que en el proceso de CCD. Dicha sollicitación es máxima para el forjado 1 en los dos procesos considerados al aplicar la carga sobre el forjado 3. Este forjado asume un 21% más de carga en el proceso de CD frente a la carga asumida por el forjado en el proceso de CCD. La sollicitación máxima de carga sobre el forjado 2, para los dos procesos constructivos, se presenta al descimbrar el forjado 2. En el proceso de CD dicho forjado asume un 7% más de carga que en el proceso de CCD.
- ✓ En el forjado 3 se presentó una mayor sollicitación de carga en el proceso de CCD frente al proceso de CD. Dicha sollicitación fue máxima para los dos procesos constructivos al descimbrar el forjado 2. Siendo un 12% mayor la sollicitación de carga para el forjado 3 en el proceso de CCD.
- ✓ Los forjados al realizar la operación de clareado, dentro del proceso de CCD, asumen una fracción importante de carga (40% al clarear el forjado 1, 49% al clarear el forjado 2 y 51% al clarear el forjado 3).
- ✓ La sollicitación de carga en puntales es superior para el proceso de CCD con respecto al proceso de CD. La carga máxima en un puntal es 1.86 veces mayor para el proceso de CCD frente al proceso de CD. No obstante, los puntales en el proceso de CCD son del orden del 50% de los puntales en un proceso de CD.
- ✓ Para el proceso de CCD son necesarios 77 m<sup>2</sup> de tableros de encofrado, 140 m de sopadas de acero y 160 puntales. Para el proceso de CD son necesarios 144 m<sup>2</sup> de tableros de encofrado, 209 m de

sopandas de acero y 240 puntales. Así, en el proceso de cimbrado y descimbrado se exige una mayor cantidad de elementos auxiliares de cimbrado.

De la comparación del proceso de CCD con el proceso de CRD se concluye:

- ✓ En general en el proceso de CCD se presenta una mayor sollicitación de carga en forjados que en un proceso de CRD. Sin embargo, en el proceso de CRD los tres forjados se ven sometidos, a edades cortas, a cargas más altas (su peso propio) que en el proceso de CCD.
- ✓ La sollicitación de carga en puntales es superior para el proceso CCD con respecto al proceso de CRD. Sin embargo, el número puntales en el proceso de CCD es del orden del 50% de los puntales en un proceso de CRD.
- ✓ Los puntales en el proceso de CRD nunca asumen una carga superior al peso propio de cada uno de los forjados.
- ✓ Para el proceso de CCD son necesarios 77 m<sup>2</sup> de tableros de encofrado, 140 m de sopadas de acero y 160 puntales. Para el proceso de CRD son necesarios 77 m<sup>2</sup> de tableros de encofrado, 105 m de sopandas de acero y 240 puntales. Así, en el proceso de CRD se exigen 100 puntales más y 35 m menos de sopandas que en el proceso de CCD.

# **CAPITULO 6. COMPARACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS Y LAS ESTIMACIONES DE MODELOS TEÓRICOS**

## **6.1. Introducción**

En el Capítulo 2 se han recogido diferentes modelos teóricos para el cálculo de la transmisión de cargas entre forjados y puntales durante la construcción de edificios en altura. Estos métodos teóricos, en general, se dividen en métodos que requieren de un software de cálculo y en métodos simplificados. En el Capítulo 5 se desarrolló un modelo de EF, que a diferencia de los modelos desarrollados hasta el momento, considera la operación del clareado. Este modelo representa con un buen grado de ajuste las cargas en los puntales y forjados obtenidas de las mediciones del estudio experimental (Véase Capítulo 4). Sin embargo, este modelo es de una complejidad elevada y requiere simular la totalidad de la estructura en un software de EF. Así, de una forma práctica y más cercana a los técnicos que trabajan en esta área, resulta conveniente evaluar si los métodos simplificados son capaces de representar la operación del clareado.

Una de las condiciones básicas que debe cumplir un método simplificado para simular la operación del clareado es considerar la rigidez real de los puntales, debido a que el clareado representa una reducción de dicha rigidez. Los métodos simplificados que se analizarán en este Capítulo son:

- Método simplificado de Duan y Chen (1995)
- Método simplificado de Fang et al. (2001)
- Método simplificado de Beeby (2001)

Las cargas estimadas por dichos métodos serán comparadas con las mediciones del estudio experimental (véase Capítulo 4) y con los resultados del modelo de EF planteado en el Capítulo 5.

## **6.2. Métodos teóricos analizados**

En 1963, Grundy y Kabaila (1963) publicaron el primer método simplificado para estimar las cargas, que un proceso evolutivo de construcción, se podían provocar en la estructura. Este método, que consiste en la aplicación de coeficientes de carga para estimar las cargas en puntales y forjados, es de uso habitual dado su facilidad de aplicación. Sin embargo, éste no es de aplicación para un proceso constructivo de CCD debido a que considera a los puntales como infinitamente rígidos.

Posteriores investigaciones (Liu et al. (1985), Stivaros y Halvorsen (1990), Mosallam y Chen (1991), Duan y Chen (1995), Moragues et al. (1996), Fang et al. (2001), Beeby (2001) y Díaz (2008))

concluyen que al considerar los puntales como infinitamente rígidos se sobrestiman las cargas en los puntales. Es así como a partir de estas investigaciones se argumenta la necesidad de considerar la rigidez real del sistema de apuntalamiento.

En este apartado se comentan métodos simplificados que consideran la rigidez real de los puntales, lo cual les hace válidos para simular la operación del clareado. Los métodos que se describen a continuación están explicados con detalle el Capítulo 2. La geometría de la estructura y el proceso constructivo analizado son los descritos en los apartados 3.2 y 3.4 de la presente Tesis Doctoral.

### 6.2.1. Método simplificado de Duan y Chen (1995)

Conocido también como el método simplificado mejorado, fue desarrollado por Duan y Chen (1995). Este método, al igual que el método simplificado de Grundy y Kabaila, no requiere de un software de cálculo, lo cual hace que su aplicación sea sencilla. Las hipótesis consideradas por éste método son las siguientes:

- ✓ El comportamiento de los forjados se considera elástico, y su rigidez dependiente del tiempo.
- ✓ Los puntales son simulados como elementos elásticos con una rigidez finita.
- ✓ Los efectos de retracción y fluencia son despreciados.
- ✓ Las cargas de los puntales se simulan como cargas uniformemente distribuidas sobre los forjados.
- ✓ El modelo es incremental, es decir, que considera la acumulación de cargas y desplazamientos.
- ✓ La cimentación se considera como infinitamente rígida.

A partir de estas hipótesis se desarrolla una formulación basada en la relación entre la rigidez de los forjados y la rigidez de los puntales. Dicha formulación y una explicación más detallada de la aplicación de este método se recogen en el apartado 2.3.1.8 de la presente Tesis Doctoral.

Los diferentes parámetros para la aplicación de este método se describen en las Tablas 6.1 y 6.2 para los forjados y puntales, respectivamente.

Tabla 6.1 Parámetros del forjado para el método simplificado de Duan y Chen (1995)

$L$ (m)	$E_j$ (GPa)	$I$ (m <sup>4</sup> )	$\gamma$
6.00	Aplicando la técnica de la madurez (véase Apéndice V)	1.302E-3	1/320

$L$  es la longitud del vano más largo del forjado,  $E_j$  es el módulo de elasticidad del hormigón de los forjados,  $I$  el momento de inercia del forjado suponiendo un ancho de la unidad y  $\gamma$  es un coeficiente que depende de las condiciones de contorno y la relación largo ancho del forjado.

Tabla 6.2 Parámetros de los puntales para el método simplificado de Duan y Chen (1995)

$H$ (m)	$E_{sh}$ (GPa)	$A_{Cimbrado}$ (m <sup>2</sup> )	$A_{Clareado}$ (m <sup>2</sup> )
2.88	210	2.02E-3	8.67E-4

$H$  es la altura de los puntales,  $E_{sh}$  es el módulo de elasticidad de los puntales,  $A_{Cimbrado}$  es la sumatoria del área de los puntales en la fase de cimbrado y  $A_{Clareado}$  es la sumatoria del área de los puntales en la fase de clareado.

En la Figura 6.1 se muestran los resultados, expresados en coeficientes de carga de media ( $C_{D\&C}$ ), aplicando el método simplificado de Duan y Chen (1995).

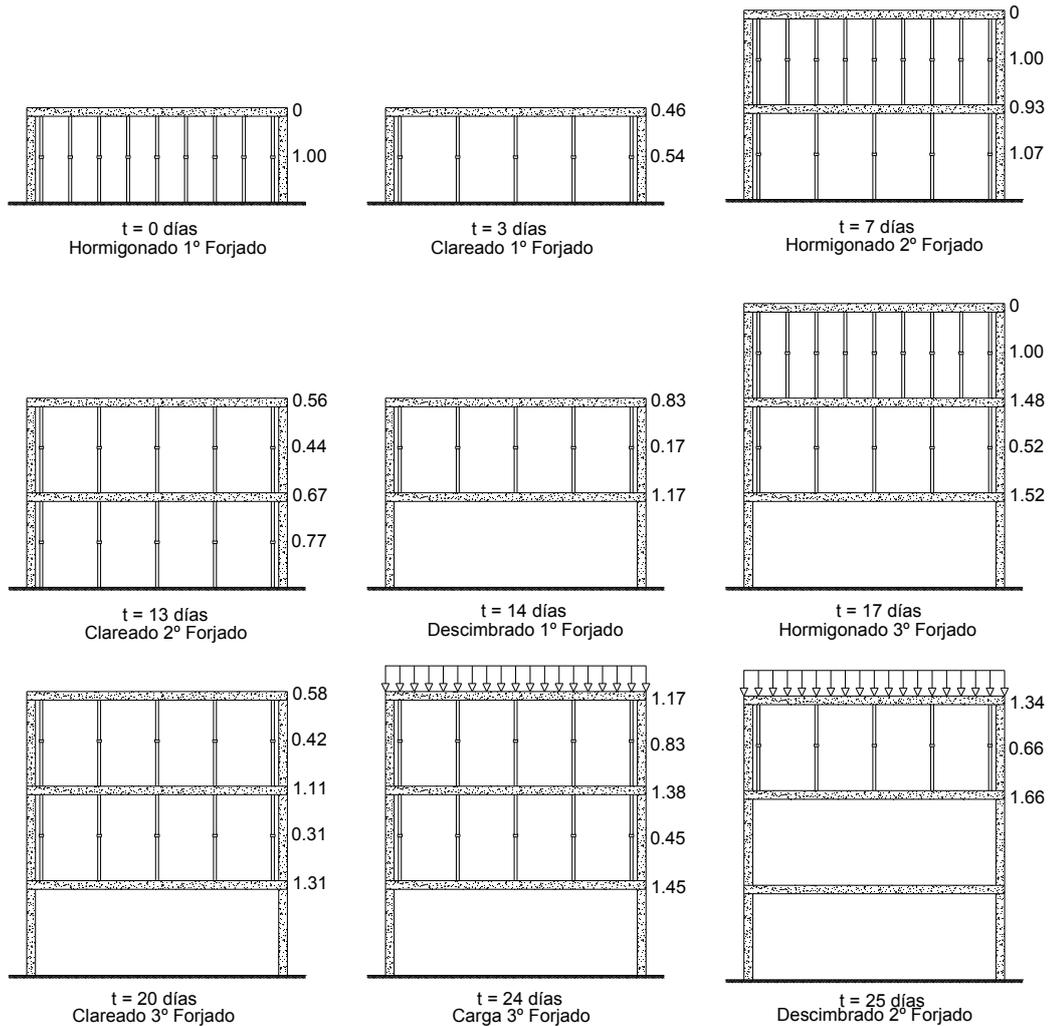


Fig. 6.1 Coeficientes de carga método simplificado de Duan y Chen (1995)

Al simular la técnica de clareado, aplicando el método simplificado de Duan y Chen, los forjados asumen una fracción importante de carga. La validez de dicho método se evalúa en posteriores apartados, donde se comparan sus resultados con las medidas experimentales y los resultados del modelo de EF desarrollado en el Capítulo 5.

### 6.2.2. Método simplificado de Fang et al. (2001)

Considerando un procedimiento para determinar la redistribución de cargas, el cual se basa en expresiones que reparten la carga en función de la relación de rigideces entre los forjados y cimbra, Fang et al. (2001) desarrollaron un nuevo método simplificado que estima las cargas entre forjados y puntales durante el proceso constructivo.

La principal aportación de este método, es considerar que durante el curado del hormigón la rigidez de los elementos estructurales varía significativamente, y en consecuencia los esfuerzos en la estructura tienen que redistribuirse especialmente en forjados recién hormigonados. Las hipótesis consideradas por Fang et al. (2001) son las siguientes:

- ✓ Modelo bidimensional, considerando la unión entre puntales y forjado como una articulación.
- ✓ Se considera la variación del módulo de elasticidad con el tiempo de los elementos de hormigón.
- ✓ La cimentación se considera como infinitamente rígida.
- ✓ Los efectos de retracción y fluencia son despreciados.
- ✓ El modelo es incremental, es decir, que considera la acumulación de cargas y desplazamientos.
- ✓ El forjado recién hormigonado evoluciona desde una situación en que no soporta ninguna carga, hasta soportar parte de su peso propio, provocando una redistribución del peso propio del forjado proporcional a su ganancia de rigidez y a la rigidez del sistema de apuntalamiento.

En el apartado 2.3.1.9 de la presente Tesis Doctoral se explican detalladamente las expresiones para calcular las cargas durante el proceso constructivo correspondientes al método simplificado de Fang et al. (2001). Los parámetros utilizados en dichas expresiones se definen en las Tablas 6.3 y 6.4.

Tabla 6.3 Parámetros del forjado para el método simplificado de Fang et al. (2001)

$L_{slab}$ (m)	$E_{ci}$ (GPa)	$I_i$ (m <sup>4</sup> )	$\lambda_i$
6.00	Aplicando la técnica de la madurez (véase Apéndice V)	1.302E-3	320

$L_{slab}$  es la luz del forjado,  $E_{ci}$  es el módulo de elasticidad del hormigón dependiente del tiempo,  $I_i$  es el momento de inercia de la franja de forjado considerado y  $\lambda_i$  el coeficiente que considera las condiciones de contorno de los forjados y la naturaleza de las cargas (diferente para cargas puntuales y cargas distribuidas).

Tabla 6.4 Parámetros de los puntales para el método simplificado de Fang et al. (2001)

$L_{shore}$ (m)	$E_{shore}$ (GPa)	$A_{shore}$ (m <sup>2</sup> )	$s$ (Cimbrado)	$s$ (Clareado)	$\rho$
2.88	210	2.89E-4	7	3	1.00

$L_{shore}$  es la longitud de los puntales,  $E_{shore}$ , es el módulo de elasticidad de los puntales,  $A_{shore}$  es el área de la sección transversal de los puntales,  $s$  es el número de puntales instalados en el vano considerado para cada uno de los procesos constructivos analizados y  $\rho$  es el coeficiente que considera las cargas desiguales en los puntales.

En la Figura 6.2 se muestran los resultados obtenidos aplicando el método simplificado de Fang et al. (2001). Dichos resultados se expresan en coeficientes de carga media en puntales ( $C_{Fang}$ ).

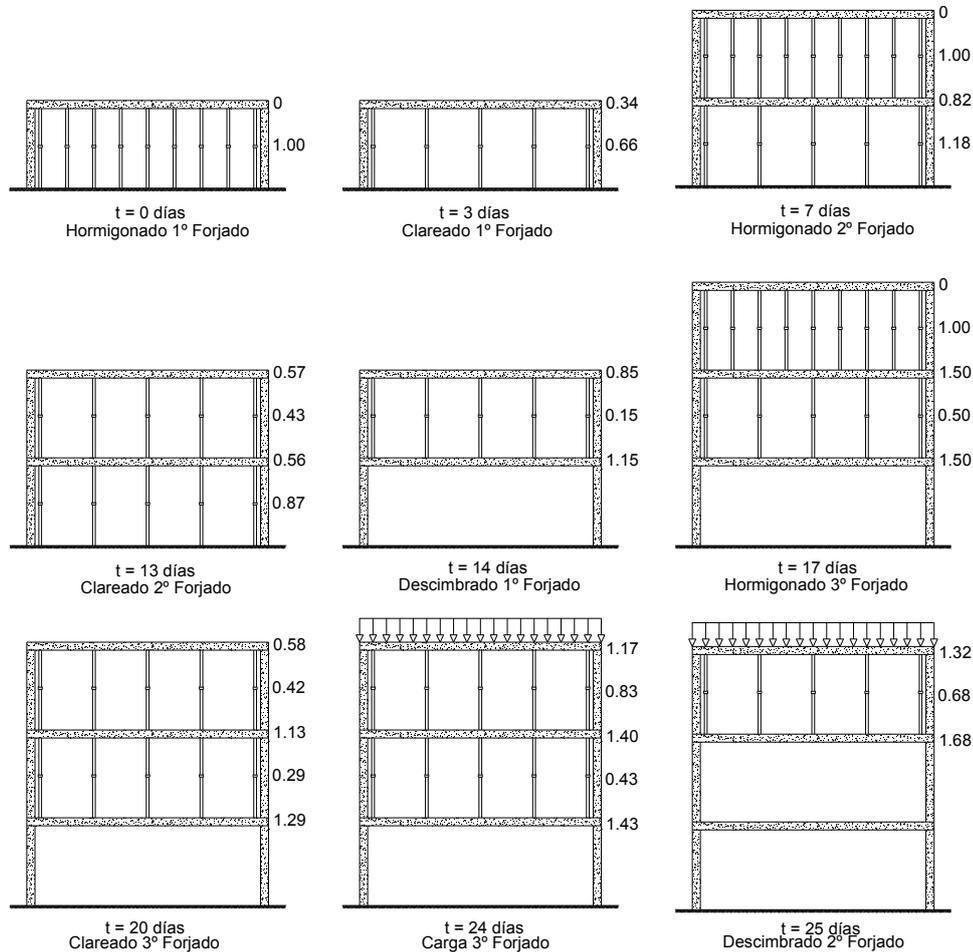


Fig. 6.2 Coeficientes de carga método simplificado de Fang et al. (1995)

En posteriores apartados se comparan los resultados obtenidos por el método simplificado de Fang et al. (2001) con las medidas experimentales que se detallan en el Capítulo 4 y con los resultados del modelo de EF desarrollado en el Capítulo 5.

### 6.2.3. Método simplificado de Beeby (2001)

El método simplificado de Beeby consiste en una variación del método simplificado de Grundy y Kabaila (1963), que se basa en considerar a los puntales con rigidez finita, considerando que los forjados tienen un comportamiento elástico con una rigidez dependiente del tiempo. Las hipótesis principales que considera dicho método son las siguientes:

- ✓ El comportamiento de los forjados se considera elástico, y su rigidez dependiente del tiempo.
- ✓ Los puntales son simulados como elementos elásticos con una rigidez finita.
- ✓ Los efectos de retracción y fluencia son despreciados.

- ✓ Las cargas de los puntales se simulan como cargas uniformemente distribuidas sobre los forjados.
- ✓ El modelo es incremental, es decir, considera la acumulación de cargas y desplazamientos.
- ✓ La cimentación se considera como infinitamente rígida.

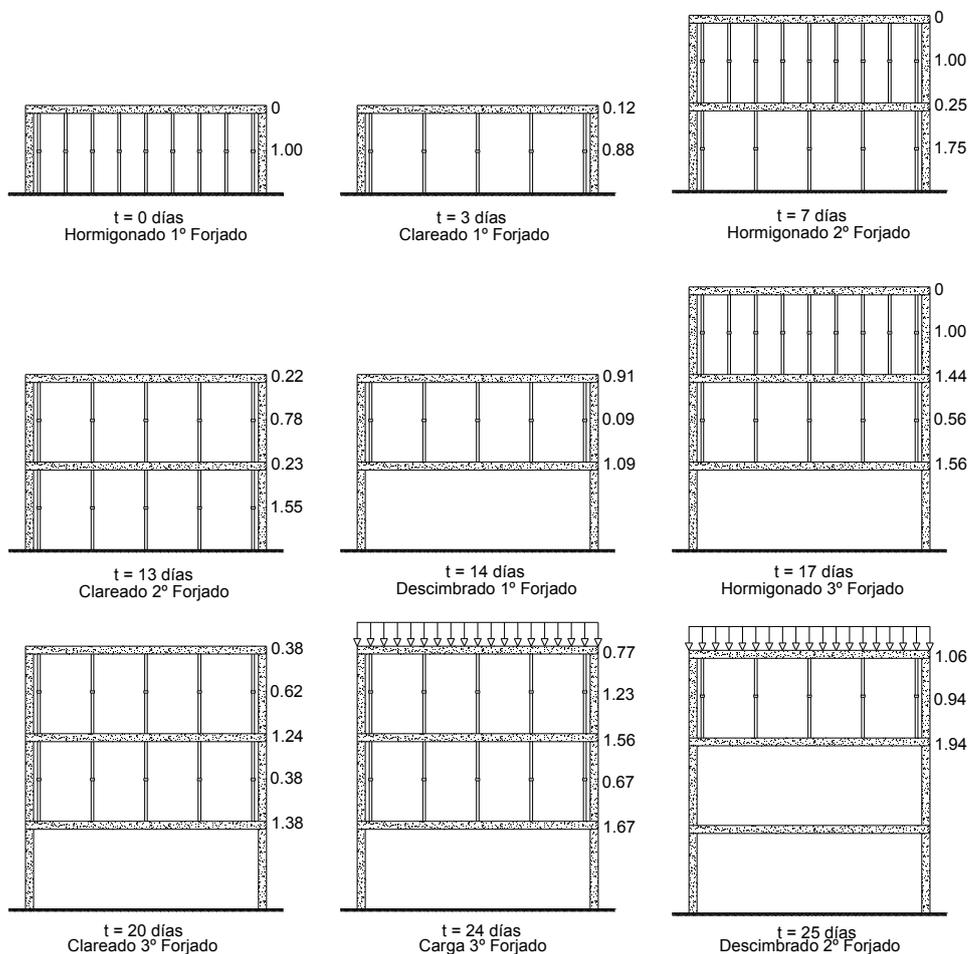


Fig. 6.3 Coeficientes de carga método simplificado de Beeby (2001)

Los parámetros de forjados y puntales, para la aplicación del método simplificado de Beeby (2001), se muestran en las Tablas 6.5 y 6.6.

En la Figura 6.3 se muestran los resultados al aplicar el método simplificado de Beeby (2001). En esta Figura se expresan los coeficientes de carga media en puntales ( $C_{Beeby}$ ). En apartados posteriores se comparan los resultados del mencionado método con las mediciones experimentales y los resultados del modelo de EF de los Capítulos 4 y 5 respectivamente.

Tabla 6.5 Parámetros del forjado para el método simplificado de Beeby (2001)

$L$ (m)	$E_j$ (GPa)	$I$ (m <sup>4</sup> )
6.00	Aplicando la técnica de la madurez (véase Apéndice V)	1.302E-3

$L$  es la luz del forjado,  $E_j$  es el módulo de elasticidad del hormigón dependiente del tiempo y  $I$  es el momento de inercia de la franja de forjado considerado.

Tabla 6.6 Parámetros de los puntales para el método simplificado de Beeby (2001)

$L$ (m)	$E$ (GPa)	$A_{Cimbrado}$ (m <sup>2</sup> )	$A_{Clareado}$ (m <sup>2</sup> )
2.88	210	2.02E-3	8.67E-4

$L$  es la altura del los puntales,  $E$  es el módulo de elasticidad de los puntales,  $A_{Cimbrado}$  es la sumatoria del área de los puntales en la fase de cimbrado y  $A_{Clareado}$  es la sumatoria del área de los puntales en la fase de clareado.

#### 6.2.4. Resumen de la aplicación de métodos teóricos simplificados

En el apartado anterior se aplico diferentes métodos teóricos simplificados que estiman la distribución de cargas entre forjados y puntales durante la construcción de edificios. Dichos métodos han sido aplicados a un proceso constructivo de CCD.

Buscando resumir los resultados obtenidos, la Tabla 6.7 muestra los coeficientes de carga media en puntales. Además, en la Tabla 6.8 se muestran los coeficientes de carga para forjados correspondientes a los coeficientes de carga media en puntales.

Tabla 6.7 Coeficientes de carga media y máxima en puntales obtenidos a partir de los métodos simplificados

Operación	Nivel	$C_{D\&C}$	$C_{Fang}$	$C_{Beeby}$
Hormigonado forjado 1	1	1.00	1.00	1.00
Clareado forjado 1	1	0.54	0.66	0.88
Hormigonado forjado 2	2	1.00	1.00	1.00
	1	1.07	1.18	1.75
Clareado forjado 2	2	0.44	0.43	0.78
	1	0.77	0.87	1.55
Descimbrado forjado 1	2	0.17	0.15	0.09
Hormigonado forjado 3	3	1.00	1.00	1.00
	2	0.52	0.50	0.56
Clareado forjado 3	3	0.42	0.42	0.62
	2	0.31	0.29	0.38
Carga forjado 3	3	0.83	0.83	1.23
	2	0.45	0.43	0.67
Descimbrado forjado 2	3	0.66	0.68	0.94

Tabla 6.8 Coeficientes de carga en forjados obtenidos a partir de los métodos simplificados

Operación	Nivel	$C_{D\&C}$	$C_{Fang}$	$C_{Beeby}$
Hormigonado forjado 1	1	0.00	0.00	0.00
Clareado forjado 1	1	0.46	0.34	0.12
Hormigonado forjado 2	2	0.00	0.00	0.00
	1	0.93	0.82	0.25
Clareado forjado 2	2	0.56	0.57	0.22
	1	0.67	0.56	0.23
Descimbrado forjado 1	2	0.83	0.85	0.91
	1	1.17	1.15	1.09
Hormigonado forjado 3	3	0.00	0.00	0.00
	2	1.48	1.50	1.44
	1	1.52	1.50	1.56
Clareado forjado 3	3	0.58	0.58	0.38
	2	1.11	1.13	1.24
	1	1.31	1.29	1.38
Carga forjado 3	3	1.17	1.17	0.77
	2	1.38	1.40	1.56
	1	1.45	1.43	1.67
Descimbrado forjado 2	3	1.34	1.32	1.06
	2	1.66	1.68	1.94

### 6.3. Comparación de los resultados obtenidos

En este apartado se comparan los resultados de cada uno de los modelos teóricos analizados en el apartado anterior con las medidas experimentales incluidas en el Capítulo 4 y con los resultados del modelo de EF desarrollado en el Capítulo 5.

#### 6.3.1. Método simplificado de Duan y Chen (1995)

En la Tabla 6.9 se muestra una comparación de los coeficientes de carga media en puntales determinados a partir del método simplificado de Duan y Chen (1995) ( $C_{D\&C}$ ), de las medidas del estudio experimental ( $C_{Exp}$ ) (véase Capítulo 4) y de los resultados del modelo de EF ( $C_{MEF}$ ) (véase Capítulo 5).

Comparando las estimaciones obtenidas por el método de Duan y Chen (1995) con las medidas del modelo experimental y con los resultados del modelo de EF, se obtiene una media de los ratios  $\frac{C_{exp}}{C_{D\&C}}$  y  $\frac{C_{MEF}}{C_{D\&C}}$  muy similar del 12 y 15%, respectivamente. Sin embargo, la desviación típica con respecto a las medidas experimentales es muy superior que la desviación obtenida para el caso del modelo de EF.

La operación y ubicación de los puntales donde se presenta el mayor coeficiente de carga máxima en puntales es la misma para el método simplificado de Duan y Chen que para el modelo de EF. Este coeficiente de carga se presenta en los puntales del forjado 1 al hormigonar el forjado 2. En relación a las mediciones del estudio experimental, el coeficiente máximo de carga se presenta al hormigonar

cualquiera de los tres forjados. Esta diferencia es debida al error cometido al retirar los tableros de encofrado del forjado 1 durante el proceso de clareado (véanse comentaritos al respecto en el apartado 4.3.2).

Tabla 6.9 Comparación de coeficientes de carga media entre el método simplificado de Duan y Chen con las medidas experimentales y con los resultados del modelo de EF

Operación	Nivel	$C_{D\&C}$	$C_{exp}$	$\frac{C_{exp}}{C_{D\&C}}$	$C_{MEF}$	$\frac{C_{MEF}}{C_{D\&C}}$
Hormigonado forjado 1	1	1.00	0.97	0.97	0.98	0.98
Clareado forjado 1	1	0.54	0.54	1.00	0.60	1.11
Hormigonado forjado 2	2	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00
	1	1.07	0.79	0.74	1.17	1.09
Clareado forjado 2	2	0.44	0.52	1.18	0.51	1.16
	1	0.77	0.68	0.88	0.95	1.23
Descimbrado forjado 1	2	0.17	0.28	1.65	0.25	1.47
Hormigonado forjado 3	3	1.00	0.98	0.98	1.00	1.00
	2	0.52	0.54	1.04	0.54	1.04
Clareado forjado 3	3	0.42	0.55	1.31	0.49	1.17
	2	0.31	0.49	1.58	0.39	1.26
Carga forjado 3	3	0.83	0.77	0.93	0.95	1.14
	2	0.45	0.60	1.33	0.60	1.33
Descimbrado forjado 2	3	0.66	0.65	0.98	0.75	1.14
<b>Media</b>	-	-	-	<b>1.12</b>	-	<b>1.15</b>
<b>Desviación Típica</b>	-	-	-	<b>0.25</b>	-	<b>0.13</b>

El error máximo, en las dos comparaciones realizadas, se presenta en los puntales del forjado 2 al descimbrar el forjado 1. Aunque en ambos casos el porcentaje de error es elevado, la diferencia entre el coeficiente de carga estimado por el método simplificado de Duan y Chen y los coeficientes de carga del estudio experimental y del modelo numérico no supera el 11% del peso propio de los forjados.

Considerando el grado de simplificación que se logra al aplicar el método simplificado de Duan y Chen, se puede considerar que dicho método estima con un aceptable grado de ajuste las cargas que se presentan en puntales y forjados para el proceso constructivo de CCD empleado en el caso estudiado.

### 6.3.2. Método simplificado de Fang et al. (2001)

La Tabla 6.10 muestra una comparación de los coeficientes de carga media en puntales determinados por el método de Fang et al. (2001) ( $C_{Fang}$ ), con las medidas del estudio experimental ( $C_{exp}$ ) (véase Capítulo 4) y con los resultados del modelo de EF ( $C_{MEF}$ ) (véase Capítulo 5).

La media de los ratios  $\frac{C_{exp}}{C_{Fang}}$  y  $\frac{C_{MEF}}{C_{Fang}}$  para las dos comparaciones es muy similar, siendo de 1.12 respecto a las medidas del estudio experimental y de 1.14 respecto a los resultados del modelo de EF. Sin embargo, la desviación típica de las medidas del estudio experimental (0.33) es muy superior que respecto a los resultados del modelo de EF (0.19).

Tabla 6.10 Comparación de coeficientes de carga media entre el método simplificado de Fang et al. con las medidas experimentales y con los resultados del modelo de EF

Operación	Nivel	$C_{Fang}$	$C_{exp}$	$\frac{C_{exp}}{C_{Fang}}$	$C_{MEF}$	$\frac{C_{MEF}}{C_{Fang}}$
Hormigonado forjado 1	1	1.00	0.97	0.97	0.98	0.98
Clareado forjado 1	1	0.66	0.54	0.82	0.60	0.91
Hormigonado forjado 2	2	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00
	1	1.18	0.79	0.67	1.17	0.99
Clareado forjado 2	2	0.43	0.52	1.21	0.51	1.19
	1	0.87	0.68	0.78	0.95	1.09
Descimbrado forjado 1	2	0.15	0.28	1.87	0.25	1.67
Hormigonado forjado 3	3	1.00	0.98	0.98	1.00	1.00
	2	0.50	0.54	1.08	0.54	1.08
Clareado forjado 3	3	0.42	0.55	1.31	0.49	1.17
	2	0.29	0.49	1.69	0.39	1.34
Carga forjado 3	3	0.83	0.77	0.93	0.95	1.14
	2	0.43	0.60	1.40	0.60	1.40
Descimbrado forjado 2	3	0.68	0.65	0.96	0.75	1.10
<b>Media</b>	-	-	-	<b>1.12</b>	-	<b>1.14</b>
<b>Desviación Típica</b>	-	-	-	<b>0.33</b>	-	<b>0.19</b>

El coeficiente de carga máxima en puntales estimado por el método de Fang et al. es aproximadamente igual que el coeficiente determinado a partir del modelo numérico de EF. Además, la operación y ubicación de los puntales de dicho coeficiente de carga máxima es la misma para ambos modelos.

El mayor porcentaje de error para ambas comparaciones se presenta en el descimbrado del forjado 1 en los puntales del forjado 2. Dicho error representa un 13% y un 10% de diferencia entre el coeficiente de carga estimado por el método de Fang et al. con el coeficiente de carga obtenido de la medición experimental y el coeficiente de carga obtenido del modelo de EF.

Utilizando el método simplificado de Fang et al. se consigue una aceptable aproximación en la estimación de cargas en los puntales y forjados frente a las medidas experimentales y frente a los resultados del modelo numérico de EF.

### 6.3.3. Método simplificado de Beeby (2001)

En la Tabla 6.11 se muestra una comparación de los coeficientes de carga media en puntales determinados a partir del método simplificado de Beeby (2001) ( $C_{Beeby}$ ), de las medidas del estudio experimental ( $C_{exp}$ ) (véase Capítulo 4) y de los resultados del modelo de EF ( $C_{MEF}$ ) (véase Capítulo 5).

La media de los ratios  $\frac{C_{exp}}{C_{Beeby}}$  y  $\frac{C_{MEF}}{C_{Beeby}}$  de las comparaciones mostradas en la Tabla 6.11 son muy próximas 1.00. Sin embargo la desviación típica es bastante alta. Siendo de 0.64 para la comparación con las medidas del estudio experimental y de 0.52 para la comparación con los resultados del modelo de EF. El tener una media de error próxima a 1.00 se debe al error que se presenta en la operación de descimbrado del forjado 1. Este error distorsiona dicha media. En el caso de desechar este valor la

media del ratio  $\frac{C_{exp}}{C_{Beeby}}$  es de 0.80 con una desviación típica de 0.24 y para el ratio  $\frac{C_{MEF}}{C_{Beeby}}$  es de 0.83 con una desviación típica de 0.15. Valores que resultan más razonables considerando la totalidad de operaciones.

Tabla 6.11 Comparación de coeficientes de carga media entre el método simplificado de Beeby con las medidas experimentales y con los resultados del modelo de EF

Operación	Nivel	$C_{Beeby}$	$C_{exp}$	$\frac{C_{exp}}{C_{Beeby}}$	$C_{MEF}$	$\frac{C_{MEF}}{C_{Beeby}}$
Hormigonado forjado 1	1	1.00	0.97	0.97	0.98	0.98
Clareado forjado 1	1	0.88	0.54	0.61	0.60	0.68
Hormigonado forjado 2	2	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00
	1	1.75	0.79	0.45	1.17	0.67
Clareado forjado 2	2	0.78	0.52	0.67	0.51	0.65
	1	1.55	0.68	0.44	0.95	0.61
Descimbrado forjado 1	2	0.09	0.28	3.11	0.25	2.78
Hormigonado forjado 3	3	1.00	0.98	0.98	1.00	1.00
	2	0.56	0.54	0.96	0.54	0.96
Clareado forjado 3	3	0.62	0.55	0.89	0.49	0.79
	2	0.38	0.49	1.29	0.39	1.03
Carga forjado 3	3	1.23	0.77	0.63	0.95	0.77
	2	0.67	0.60	0.90	0.60	0.90
Descimbrado forjado 2	3	0.94	0.65	0.69	0.75	0.80
<b>Media</b>	-	-	-	<b>0.97</b>	-	<b>0.97</b>
<b>Desviación Típica</b>	-	-	-	<b>0.64</b>	-	<b>0.52</b>

El método de Beeby, respecto a los resultados del modelo de EF, predice correctamente la operación y ubicación de los puntales donde se presenta el coeficiente de carga máxima. Sin embargo en general los coeficientes de carga obtenidos por dicho método difieren considerablemente de los obtenidos experimentalmente y de los obtenidos en el modelo numérico de EF. Por este motivo el método de Beeby no resulta adecuado para predecir las cargas en puntales y forjados para un proceso constructivo de CCD.

#### 6.4. Conclusiones relativas a la comparación entre los resultados obtenidos y las estimaciones de modelos teóricos

En el presente Capítulo se han comparado los resultados de diferentes métodos simplificados con las medidas experimentales recogidas en el Capítulo 4 y con los resultados del modelo numérico de EF desarrollado en el Capítulo 5.

El primer método analizado es el método simplificado de Duan y Chen (1995). Los resultados obtenidos aplicando dicho método son bastante próximos a las medidas experimentales. Presentándose una media del ratio  $\frac{C_{exp}}{C_{D\&C}}$  de 1.12 con una desviación típica de 0.25. Frente a los resultados del modelo de EF el ajuste mejora. Aunque la media del ratio  $\frac{C_{MEF}}{C_{D\&C}}$  es superior siendo de 1.15, la desviación típica

disminuye a 0.15. En general, analizando el valor medio de las relaciones  $\frac{C_{exp}}{C_{D\&C}}$  y  $\frac{C_{MEF}}{C_{D\&C}}$ , el método simplificado de Duan y Chen subestima las cargas que se presentan en los puntales. Lo que se traduce en sobreestimar las cargas que se presentan en los forjados.

El segundo método analizado es el método simplificado de Fang et al. (2001). Dicho método considera las mismas hipótesis que el método simplificado de Duan y Chen (1995), pero asume que entre cada una de las operaciones constructivas se produce una redistribución de cargas. Dicha redistribución de cargas se le atribuye a la ganancia de rigidez de los elementos de hormigón. Esto obliga a realizar un cálculo de la distribución de cargas antes y después de cualquier operación. Los resultados obtenidos con este método son muy similares a los obtenidos con el método de Duan y Chen (1995). El ratio  $\frac{C_{exp}}{C_{Fang}}$  es 1.12 con una desviación típica de 0.33. Respecto a los resultados del modelo de EF el ratio  $\frac{C_{MEF}}{C_{Fang}}$  es de 1.14 con una desviación típica de 0.19. De la misma forma que el método simplificado de Duan y Chen (1995), el método simplificado de Fang et al. (2001) subestima las cargas en los puntales lo que lleva a sobreestimar las cargas en los forjados.

El tercer método analizado es el método de Beeby (2001). Este método considera los puntales con una rigidez finita, y a los forjados con un comportamiento elástico de rigidez dependiente del tiempo. Aplicando este método no se obtuvieron buenos resultados respecto a las medidas experimentales y a los resultados del modelo de EF. Los valores de los ratios  $\frac{C_{exp}}{C_{Beeby}}$  y  $\frac{C_{MEF}}{C_{Beeby}}$  son de 0.97 pero con una desviación típica de 0.64 y 0.52. La tendencia general de este método es sobreestimar las cargas en los puntales lo que lleva a subestimar las cargas en los forjados.

En general el método que presenta un mayor ajuste a las medidas experimentales y a los resultados del modelo numérico es el método simplificado de Duan y Chen (1995). A pesar de tener una media de error sensiblemente mayor que la del método propuesto por Fang et al. (2001) su desviación típica es considerablemente inferior. Lo que a nivel de cada operación constructiva lo hace más preciso. Este método es el que se ajusta mejor a las medidas experimentales obtenidas en la estructura estudiada.

## CAPITULO 7. CONCLUSIONES Y PROPUESTA DE NUEVAS INVESTIGACIONES

### 7.1. Conclusiones

En la presente Tesis Doctoral se han estudiado los efectos que tiene, sobre la transmisión de cargas entre forjados y puntales, la operación de clareado en la construcción de edificios con forjados hormigonados in situ. A partir del trabajo realizado, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- a. La operación del clareado es de uso habitual en la construcción de edificios de forjados consecutivos de hormigón in situ en España. El método introduce, en el proceso constructivo, un alto grado de racionalización y economía. Sin embargo, en muchas ocasiones se pone en cuestión su viabilidad por las dudas que plantea la estimación de cargas en puntales y forjados durante el proceso constructivo. Pese a ello, son escasas las investigaciones que estudian el efecto que esta operación tiene sobre la transmisión de cargas entre forjados y puntales. Sólo Moragues et al. (1992,1996) han estudiado, experimental y teóricamente, el efecto del proceso constructivo de CCD. La carencia de estudios relacionados con este procedimiento evidencia la necesidad de realizar un estudio experimental, en condiciones controladas, que permita validar y calibrar un modelo teórico que simule el proceso de CCD.
- b. Con el objeto de analizar el efecto que el proceso de CCD tiene sobre la transmisión de cargas entre forjados y puntales, en el Capítulo 3 se planteó un estudio experimental. Este estudio experimental consistió en la construcción de un edificio de tres plantas con forjados de losa maciza de hormigón armado de 0.25 m de canto. La transmisión de cargas entre los forjados y los puntales se evaluó a partir de la medida de las deformaciones en los puntales.
- c. Una vez planteado el programa experimental, el día 28 de noviembre de 2006 se inició la toma de medidas con el hormigonado del primer forjado, y el día 23 de diciembre de 2006 se terminó con el descimbrado del segundo forjado. Dichas medidas experimentales se dividen en dos partes. En la primera se consideran las medidas instantáneas, es decir, medidas de los incrementos de carga tomadas una vez ejecutada cada una de las operaciones del proceso constructivo. Estas medidas permiten establecer cómo se distribuyen las cargas debidas a las diferentes operaciones del proceso constructivo. La segunda parte de medidas consiste en la medición continua, es decir, medidas tomadas en el tiempo transcurrido entre cada una de las fases del proceso constructivo. Con estas medidas se evalúa cual es la variación de cargas en los puntales debido a efectos temporales como las sobrecargas de construcción, la evolución de las propiedades del hormigón o, sobre todo, la variación de las condiciones climáticas. Del análisis de la medición instantánea se concluye:
  - Una vez hormigonado un forjado, la totalidad de la carga es asumida por los puntales. La distribución de dicha carga en cada uno de los puntales es proporcional al área tributaria

de cada uno de ellos, y está condicionada por la manera en que se encuentren los puntales ajustados sobre las sopandas. Así, si un puntal se encuentra excesivamente ajustado (o apretado), los puntales contiguos reciben menos carga y por el contrario si un puntal está escasamente ajustado, los puntales que lo rodean recibirán mayor cantidad de carga.

- Al realizar la operación de clareado, los forjados asumen una fracción importante de carga. Para el caso estudiado, los porcentajes de carga que asumieron los forjados, en relación a su peso propio, una vez clareados, fueron del 46% para el forjado 1, 48% para el forjado 2 y 45% para el forjado 3.
- Al aplicar una carga nueva sobre un forjado previamente clareado, ésta es asumida en gran parte por dicho forjado. En general el valor medio de la carga asumida por los forjados, objeto de este estudio, fue de un 75% de la carga aplicada.
- En el descimbrado de un forjado, la carga que asumían los puntales retirados se reparte entre los forjados superiores. Según el proceso seguido en el estudio planteado, al descimbrar un forjado, el forjado inmediatamente superior se encontraba previamente clareado, lo cual influye en el reparto de las cargas. Para el caso estudiado, al descimbrar el forjado 1 la carga que tenían los puntales retirados fue asumida en un 69% por el forjado 1 y el restante por el forjado 2. En el caso del descimbrado del forjado 2, la carga que tenían los puntales retirados la asumió en un 80% el forjado 2 y en un 20% el forjado 3.
- Al realizar las operaciones de clareado, descimbrado y hormigonado sobre un forjado ya endurecido, el reparto de cargas en los puntales no es uniforme. Este reparto depende de la deformación del forjado. Así, las cargas máximas en los puntales se corresponden con puntos donde la flecha del forjado es máxima.

Los registros obtenidos mediante la medición continua permiten determinar la carga real que tienen los puntales en cualquier instante. Sin embargo, estos registros no permiten apreciar el efecto real que las diversas operaciones constructivas tienen sobre la transmisión de cargas al presentarse importantes variaciones de carga en cada uno de los puntales. De los resultados obtenidos de la medición continua se concluye:

- Durante la medición continua, la carga en cada uno de los puntales presenta variaciones significativas (entre el 13 y el 50% de su carga inicial). Dichas variaciones siguen una misma pauta de comportamiento que depende de las variaciones de temperatura ambiente en la obra. La pauta de comportamiento de dicha variación, se corresponde con un aumento de la carga en los puntales al descender la temperatura, y a un descenso de carga en los puntales al aumentar la temperatura.
- La variación de carga en los puntales, debido a la variación de temperatura, cobra una mayor importancia cuando el forjado está completamente cimbrado que cuando está clareado.
- Un vez hormigonados los forjados, la variación de carga media por unidad de superficie debido a los cambios de temperatura, es de  $\pm 0.34 \text{ kN/m}^2$  en el forjado 1 y de  $\pm 0.21 \text{ kN/m}^2$  en los forjados 2 y 3 para variaciones de temperatura de  $\pm 1^\circ\text{C}$ .
- Al estar los forjados clareados, la variación de la carga media por unidad de superficie debido a los cambios de temperatura, es de  $\pm 0.10 \text{ kN/m}^2$  en el forjado 1 y de  $\pm 0.13 \text{ kN/m}^2$  en los forjados 2 y 3 para variaciones de temperatura de  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

d. En el Capítulo 5 se desarrolla un modelo de EF, mediante el cual se pretende simular la transmisión de cargas entre forjados y puntales durante el proceso constructivo. La validación de dicho modelo se realiza a partir de las medidas experimentales incluidas en el Capítulo 4, simulando un proceso de CCD. Una vez el modelo de EF queda verificado, se realiza un estudio comparativo entre los procesos constructivos habituales en la construcción de edificios y el proceso de CCD. De la comparación del proceso constructivo de CD con el proceso constructivo de CCD se concluye:

- En el proceso de CD se presentan mayores solicitaciones en los forjados que en el proceso de CCD.
- Las cargas en los puntales para un proceso de CCD son superiores a las cargas para un proceso de CD. No obstante, en el proceso de CCD, una vez se realiza la operación de clareado, la cantidad de puntales bajo un forjado es un 50% que la de los puntales en el proceso de CD.
- El material necesario para el encofrado y cimbrado en un proceso de CD es del orden del doble que para un proceso de CCD. Esto es debido a que al realizar la operación de clareado se puede recuperar una gran parte de los componentes utilizados (100% de tableros de encofrado y más del 50% de puntales y sopandas), que pueden ser utilizados posteriormente en la construcción del forjado superior consecutivo. Este factor repercute directamente sobre el coste de construcción de la estructura.

El proceso de CCD también se compara con un proceso de CRD. De dicha comparación se extraen las siguientes conclusiones:

- En un proceso de CCD se presenta una mayor solicitación en los forjados que en un proceso de CRD.
- En el proceso de CCD los puntales presentan un nivel de carga superior que en el proceso de CRD. Sin embargo, el número de puntales para un forjado en el proceso de CRD es de más del doble que en el proceso de CCD.
- La operación de clareado requiere un menor tiempo transcurrido desde el hormigonado del forjado, que en el caso de la operación de recimbrado. Esto es debido a que en la operación de recimbrado, el forjado pasa a asumir la totalidad de su peso propio, mientras que al realizar la operación de clareado el forjado asume una fracción de su peso propio y el restante es asumido por los puntales. De esta forma la recuperación de los tableros de encofrado en el proceso de CCD es más rápida, lo que permite su reutilización en la planta inmediatamente superior.
- El proceso de CCD, al ser un proceso más industrializado, resulta más eficiente que el proceso de CRD. En la operación de recimbrado de un proceso CRD, todos los puntales son retirados para posteriormente ser reinstalados. En esta operación se debe garantizar la posición, verticalidad y un perfecto ajuste entre los forjados de cada uno puntales. Esta última particularidad convierte al recimbrado en una operación delicada y de difícil control.

e. Con el objeto de estimar de una forma más sencilla la transmisión de cargas entre forjados y puntales durante el proceso constructivo de CCD, en el Capítulo 6 se estudia la aplicación de métodos teóricos simplificados que permiten simular la operación de clareado. La condición

fundamental que estos métodos deben cumplir para aplicarlos a un proceso de CCD se basa en considerar los puntales como elementos con un comportamiento elástico y de rigidez finita. Así, la operación de clareado se simula como una reducción de la rigidez del conjunto de puntales instalados bajo un forjado. A partir del análisis planteado en el Capítulo 2 se considera que los métodos simplificados de Duan y Chen (1995), Fang et al. (2001) y Beeby (2001) son aplicables para simular la operación de clareado. Los resultados obtenidos de la aplicación de cada uno de los métodos simplificados son comparados con las medidas experimentales expuestas en el Capítulo 4 y los resultados del modelo de EF expuestos en el Capítulo 5 para el proceso de CCD. En general el método que presenta un mejor ajuste con las medidas experimentales y los resultados del modelo de EF es el método simplificado de Duan y Chen (1995). Este método es, en general, más preciso que los métodos propuestos por Fang et al. (2001) y Beeby (2001). Por esta razón se puede afirmar que este método es válido para estimar las cargas en puntales y forjados para el proceso constructivo de CCD analizado en la presente Tesis Doctoral.

## **7.2. Aportación original de la Tesis Doctoral**

Hasta la fecha, las investigaciones relacionadas con la transmisión de cargas entre forjados y puntales, considerando un proceso constructivo de CCD, resultan escasas. En la presente Tesis Doctoral se ha estudiado el efecto que la operación de clareado produce en la transmisión de cargas entre los forjados y puntales. Dentro del avance en el conocimiento aportado, son de destacar las siguientes aportaciones:

- a. Por primera vez se ha desarrollado un estudio experimental, a escala real, construyendo una estructura mediante un proceso de CCD. A partir de las medidas obtenidas en dicho estudio, se ha observado que los forjados asumen una fracción importante de carga al realizar la operación de clareado.
- b. A partir de las medidas realizadas en el estudio experimental, se ha determinado la importancia que las variaciones de temperatura ambiente tienen sobre las cargas en los puntales durante el proceso constructivo.
- c. Se ha realizado y validado una modelización por el MEF en tres dimensiones a partir de la cual se conoce como se distribuyen las cargas entre forjados y puntales para diferentes procesos constructivos. A partir de los modelos de EF desarrollados, se han determinado las posibles ventajas y desventajas que un proceso de CCD tiene frente a los procesos de CD y CRD.
- d. Se han aplicado métodos simplificados desarrollados para procesos de CD y CRD al proceso de CCD. A partir de esta aplicación, se ha observado que el uso del método simplificado de Duan y Chen (1995), estima, con un buen grado de ajuste, la distribución de cargas entre forjados y puntales para el caso estudiado, donde se empleó la operación de clareado.

## **7.3. Propuesta de nuevas investigaciones**

Después del desarrollo de la presente Tesis Doctoral, se evidencia la necesidad de realizar nuevas investigaciones relacionadas con la distribución de cargas entre forjados y puntales en la construcción de edificios de hormigón in situ. Las posibles investigaciones futuras, relacionadas con el tema, podrían ser:

- a. En la presente Tesis Doctoral, se ha desarrollado un estudio experimental y teórico del efecto que la operación de clareado tiene sobre la transmisión de cargas entre forjados y puntales durante la construcción de edificios de hormigón in situ. Dicho estudio se ha basado en la consideración de una única tipología estructural que consiste en un edificio resuelto con forjados de losa maciza de hormigón armado. Sería interesante realizar una investigación experimental y teórica en la que se estudien las tipologías de forjados más comunes en edificación. El estudio experimental podría desarrollarse en un número significativo de obras reales instrumentado un número determinado de puntales, aunque lo ideal sería construir un edificio probeta, tal y como se ha realizado en esta investigación. El siguiente paso, una vez desarrollado el estudio experimental, sería aplicar los modelos teóricos expuestos en la presente Tesis Doctoral (modelo de EF y métodos simplificados) a las diferentes tipologías de estructuras estudiadas, y así validar su uso para las diversas situaciones que se presentan en la construcción de edificios de hormigón in situ.
- b. La importancia de la variación de temperatura ambiente sobre las cargas en puntales ha sido mencionada por Azkune (2007) y confirmada también a partir de las medidas experimentales expuestas en el Capítulo 4 de la presente Tesis Doctoral. Estos cambios de temperatura afectan a los diferentes elementos de la estructura durante su construcción (forjados, pilares, puntales, tableros de encofrado y sopandas), afectando finalmente a la variación de carga en los puntales. Por este motivo, sería preciso, mediante el desarrollo de un estudio experimental, conocer la temperatura de cada uno de estos elementos y determinar su influencia en la variación de carga en los puntales mediante el desarrollo de un modelo teórico de EF.
- c. Autores como Serrà (1994) y Marí (1995) han determinado la influencia que tiene el descimbrar elementos de hormigón a edades jóvenes sobre la deformabilidad diferida. Por lo tanto, sería de un gran interés plantear un estudio en el que se analizase la influencia que la operación de clareado pueda tener sobre la deformabilidad diferida en los forjados.
- d. Dentro de las conclusiones del Capítulo 5, y de una forma cualitativa, se ha realizado una valoración del material de encofrado y cimbrado necesario para distintos procesos constructivos (proceso de CCD, proceso de CD y proceso de CRD). La cantidad de material utilizado en cada uno de estos procesos es directamente proporcional al coste de ejecución de la estructura. Sería interesante realizar un estudio que permita, considerando variables como el número de plantas del edificio y su superficie, determinar cuál sería el proceso constructivo óptimo para determinados grupos de estructuras de características similares.



## REFERENCIAS

- ACI Committee 318 (1970). "Buildings code requirements for reinforced concrete", Detroit.
- ACI Committee 347 (1988). "Guide to formwork for concrete", ACI Structural Journal, 530-562.
- ACI Committee 347 (2005). "Guide for shoring/reshoring of concrete multistory buildings", Farmington Hills.
- Adam JM, Pallarés FJ, Calderón PA, Payá IJ (2007). "A study of the conditions of use of a new safety system for the building industry", Engineering Structures, 29(8), 1690-1697.
- AENOR (1996). "UNE 83316:1996. Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad de hormigón a compresión", Madrid.
- AENOR (2003). "UNE -EN 12390-3:2003. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas", Madrid.
- Agarwal RK, Gardner NJ (1974). "Form and shore requirements for multi-story flat slab type buildings", ACI Journal Proceedings, 71(11), 559-569.
- ALSINA (2009). "Catálogo general de productos y servicios".
- Alvarado YA, Calderón PA, Pallarés FJ, Pellicer T (2005). "Estimation of shore removal times in bi-directional in situ concrete floor slabs applying the maturity method", Bangkok, Thailand.
- Alvarado YA (2007). "Definición de un modelo experimental y numérico de la construcción de forjados bidireccionales hormigonados in situ mediante cimbrado y descimbrado de plantas sucesivas con clareado de puntales", Dpto. de Ingeniería de la construcción y proyectos de ingeniería civil, Universidad Politécnica de Valencia.
- Alvarado YA, Calderón PA, Adam JM, Pallares FJ, Payá IJ, Pellicer T (2008). "Cargas en puntales en la construcción de edificios con clareado", IV Congreso de ACHE Congreso Internacional de Estructuras, Valencia.
- Alvarado YA, Calderón PA, Adam JM, Payá IJ, Pellicer T, Pallares FJ, Moragues JJ, (2009). "An experimental study into the evolution of loads on shores and slabs during construction of multistory buildings using partial striking", Engineering Structures (2009), doi: 10.1016/j.engstruct.2009.03.021.
- Alvarez R (1983). "Comportamiento de las estructuras de hormigón en edificación durante el proceso constructivo", Hormigón y Acero, 152, 25-37.

Ambrose TP, Huston DR, Fuhr PL, Devino EA, Werner MP (1994). "Shoring systems for construction load monitoring", *Smart Materials and Structures*, 3, 26-34.

ANSYS Inc. (2005). "ANSYS theory reference 10.0".

ASTM (1999). "Standard practice for estimating concrete strength by the maturity method. ASTM C 1074-98", Philadelphia.

Azkune M, Puente I (2007). "Evolución de la distribución de cargas entre puntales y forjados durante la construcción", *Hormigón y Acero*, 245(3), 79-91.

Azkune M, Puente I, Insausti A (2007). "Effect to ambient temperature on the redistribution of loads during construction of multi-storey concrete structures", *Engineering Structures*, 29(6), 933-941.

Azkune M (2007). "Transmisión de cargas en la ejecución de edificios de hormigón: mediciones en obra y análisis teórico", Tesis Doctoral, Universidad de Navarra, San Sebastián.

Beeby AW (2001). "Criteria for the loading of slabs during construction", *Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 146(2), 195-202.

Beeby AW (2001). "The forces in backprops during construction of flat slab structures", *Structures and Buildings*, 146(3), 307-317.

Blackey FA, Beresford FD (1965). "Stripping of formwork for concrete in buildings in relation to structural design", *Civil Engineering Transactions*, Ce7, 2:92, 2:96.

Calavera J, Fernández J (1991). "Cuaderno N° 3: Criterios para el descimbrado de estructuras de hormigón", INTEMAC, Madrid.

Calavera J (2002). "Calculo, construcción, patología y rehabilitación de forjados de edificación", INTEMAC, Madrid.

Calderón PA, Adam JM (2005). "Estudio experimental de las condiciones de utilización del sistema anticaidas de ALSINA (Alsipercha)", Valencia.

Catalá J, Moragues JJ, Salort V, Sirvent PL (1992). "Transmisión de cargas entre forjados durante el proceso constructivo: Medidas realizadas en obra", Valencia.

CEB-FIP (1991). "Model code 90", Laussane.

Chen WF, Mosallam K (1991). "Concrete buildings: Analysis for safe construction", Boca Raton.

Díaz J (2008). "Criterios técnicos para el descimbrado de estructuras de hormigón", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

Duan MZ, Chen WF (1995). "Improved simplified method for slab and shore load analysis during construction", Project Report CE-STR-95-24, West Lafayette, Ind.

- Duan MZ, Chen WF (1996). "Design guidelines for safe concrete construction", *Concrete International*, 18(10), 44-49.
- El-Shahhat AM, Chen WF (1992). "Improved analysis of shore-slab interaction", *ACI Structural Journal*, 89(5), 528-537.
- El-Shahhat AM, Rosowsky DV, Chen WF (1993). "Construction safety of multistory concrete buildings", *ACI Structural Journal*, 90(4), 335-341.
- El-Shahhat AM, Rosowsky DV, Chen WF (1994). "Partial factor design for reinforced concrete buildings during construction", *ACI Structural Journal*, 91(4), 475-485.
- Eldukair ZA, Ayyub BM (1991). "Analysis of recent U.S. structural and construction failures", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 5(1), 57-73.
- ENV 1992-1-1 (Eurocode N° 2) (1991). "Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for Buildings".
- Epaarachchi DC, Stewart MG, Rosowsky DV (2002). "Structural reliability of multistory buildings during construction", *Structural Engineering*, 128(2), 205-213.
- Fang DP, Zhu HY, Geng CD, Liu XL (2001). "On site measurement of load distribution in reinforced concrete buildings during construction", *ACI Structural Journal*, 98(2), 157-163.
- Fang DP, Geng CD, Zhu HY, Liu XL (2001). "Floor load distribution in reinforced concrete buildings during construction", *ACI Structural Journal*, 98(2), 149-156.
- Feld J, Carper K (1997). "Construction Failure", John Wiley and Sons.
- Fernández J (1986). "Estudio experimental de la evolución de las características mecánicas del hormigón curado en diversas condiciones y su aplicación al cálculo de los procesos de descimbrado", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Freisleben H, Pedersen EJ (1977). "Maleinstrument til kontrol of betons haerdning", *Nordisk Betong*, 1, 21-25.
- Gardner NJ, Poon SM (1976). "Time and temperature effects on tensile, bond and compressive strengths", *ACI Journal Proceedings*, 73(7), 405, 409.
- Grundy P, Kabaila A (1963). "Construction loads on slabs with shored formwork in multistory buildings", *ACI Structural proceedings*, 60(12), 1729-1738.
- Guo C (1989). "Maturity of concrete: method for predicting early-stage strength", *ACI Materials Journal*, 86(4), 341, 353.
- Johnston DW, Wheeler LK (2003). "Guide to formwork for concrete", *ACI 347*, 347-1, 347-32.
- Kaminetzky D, Stivaros P (1994). "Early-Age Concrete: Construction Loads, Behavior, and failures", *Concrete International*, 16(1), 58-62.

Klieger P (1958). "Effect of mixing and curing temperature on concrete strength", ACI Journal Proceedings, 54(6), 1063,1081.

Laplante P, Boulay C (1994). "Evolution du coefficient de dilatation thermique du béton en fonction de sa maturité aux tout premiers ages", Materials and structures, Springer Netherlands.

Lasisi M, Ng SF (1979). "Construction loads imposed on high-rise floor slabs", Concrete International, 1(2), 24-29.

Lee HM, Liu XL, Chen WF (1991). "Creep analysis of concrete buildings during construction", Journal of Structural Engineering, 117(10), 3135-3148.

Liu XL, Chen WF, Bowman MD (1985). "Construction load analysis for concrete structures", Journal of Structural Engineering, 111(5), 1019-1036.

Liu XL, Chen WF, Bowman MD (1985). "Construction loads on supporting floors", Concrete International, 7(12), 21-26.

Liu XL, Chen WF, Bowman MD (1986). "Shore-slab interaction in concrete buildings", Journal of Construction Engineering and Management, 112(2), 227-244.

Liu XL, Chen WF (1987). "Probability distribution of maximum wooden shore loads in multistorey R/C buildings", Structural Safety, 4, 197-215.

Marí AR, Serrà I (1995). "Criterios para la determinación de plazos de descimbrado en estructuras de hormigón armado solicitadas a flexión", Hormigón y Acero, 197, 41-55.

Ministerio de Fomento (1999). "Instrucción de hormigón estructural. EHE", Madrid.

Ministerio de Fomento (2008). "Instrucción de hormigón estructural. EHE-08", Madrid.

Miranda JF, Silva MR, Ramalho MA (2003). "A new procedure for the analysis of construction loads in multistory reinforced concrete structures", The structural design of tall and special buildings, 12(4), 293, 315.

Moragues JJ (1992). "Algunas mediciones reales en cimbrados de plantas consecutivas realizadas en España", Valencia.

Moragues JJ, Catalá J, Pellicer E (1994). "Mediciones en obra y análisis teórico de estructuras de edificación, de hormigón armado, durante el proceso de cimbrado consecutivo de forjados", Hormigón y Acero, 190, 83-91.

Moragues JJ, Catalá J, Pellicer E (1996). "An analysis of concrete framed structures during the construction process", Concrete International, 18(11), 44-48.

Mosallam K, Chen WF (1990). "Design considerations for formwork in multistorey concrete buildings", Engineering Structures, 12(3), 163-172.

- Mosallam K, Chen WF (1991). "Determining shoring loads for reinforced concrete construction", *ACI Structural Journal*, 88(3), 340-350.
- Mosallam K, Chen WF (1992). "Construction load distributions for laterally braced formwork", *ACI Structural Journal*, 89(4), 415-424.
- Nielsen K (1952). "Loads on reinforced concrete floor slabs and their deformations during construction", Final report, 15, Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, Royal Institute of Technology.
- Pallett P (2001). "Guide to flat slab formwork and falsework", *CONSTRUCT*, Berkshire.
- Pallett P (2003). "Striking of flat slabs", *Concrete*, 37(5), 30-32.
- Perepérez B (1981). "La resistencia a compresión simple, la resistencia a tracción y el módulo de deformación de hormigones fabricados con cementos PA-350", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Perepérez B, Barberá E (2004). "Cuaderno Nº 55: Temperatura, madurez y resistencia del hormigón", *INTEMAC*, Madrid.
- Puente I, Azkune M, Insausti A (2007). "Shore-slab interaction in multistory reinforced concrete buildings during construction: An experimental approach", *Engineering Structures*, 29(5), 731-741.
- Rosowsky DV, Philbrick TW, Huston DR (1997). "Observations from shore load measurements during concrete construction", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 11(1), 18-23.
- Serrà I, Marí AR, Lopez F (1993). "Estudio experimental del comportamiento de las vigas de hormigón armado, descimbradas a tempranas edades", *Hormigón y Acero*, 189, 93-105.
- Serrà I (1994). "Estudio experimental del comportamiento de vigas de hormigón armado descimbradas a tempranas edades", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña.
- Stewart MG (2001). "Effect of construction and service loads on reliability of existing RC buildings", *Journal of structural engineering*, 127(10), 1232-1235.
- Stivaros P, Halvorsen G (1990). "Shoring reshoring operations for multistory buildings", *ACI Structural Journal*, 87(5), 589-596.
- Stivaros P, Halvorsen G (1991). "Equivalent frame analysis of concrete buildings during construction", *Concrete International*, 13(8), 57-62.
- Taylor PJ (1967). "Effects of formwork stripping time on deflections of flat slabs and plates", *Australian civil engineering and construction*, 8(2), 31-35.
- Vollum R.L. (2003). "Investigation into backprop forces and deflections at St George Wharf", *Magazine for Concrete Research*, 55, 449-460.

Waller V, d'Aloia L, Cussigh F, Lecrux S (2004). "Using the maturity method in concrete cracking control at early ages", *Cement and Concrete Composites*, 26, 589-599.

## APÉNDICE I. PLANOS DEL MODELO EXPERIMENTAL

### I.1. Introducción

En el Capítulo 3 quedó definido el estudio experimental que se planteó como un ensayo a escala real. El modelo a escala real fue construido en las instalaciones de ICITECH en la Universidad Politécnica de Valencia. El modelo experimental consistió en tres forjados resueltos mediante losas de hormigón armado de 25 cm de canto, con una luz entre pilares de 6 m y un voladizo de 1.80 m. Los forjados se apoyaron en cuatro pilares de sección rectangular.

En el presente apéndice se muestran los planos de replanteo, armado y detalle del edificio. Así mismo, se muestran los planos indicando la disposición de los elementos instrumentados en cada uno de los forjados. El índice de planos es el que se muestra a continuación:

PLANO N°1: Losa de cimentación.

- 1.1. Planta de replanteo y punzonamiento
- 1.2. Armado base y refuerzos transversales
- 1.3. Armado base y refuerzos longitudinales

PLANO N°2: Forjados F+01 y F+02.

- 2.1. Planta de replanteo y punzonamiento
- 2.2. Armado base y refuerzos transversales
- 2.3. Armado base y refuerzos longitudinales

PLANO N°3: Cubierta.

- 3.1. Planta de replanteo y punzonamiento
- 3.2. Armado base y refuerzos transversales
- 3.3. Armado base y refuerzos longitudinales.

PLANO N°4: Pórticos.

- 4.1. Pórticos F+01, F+02
- 4.2. Pórticos Cubierta.

PLANO N°5: Cuadro de pilares.

PLANO N°6: Detalles.

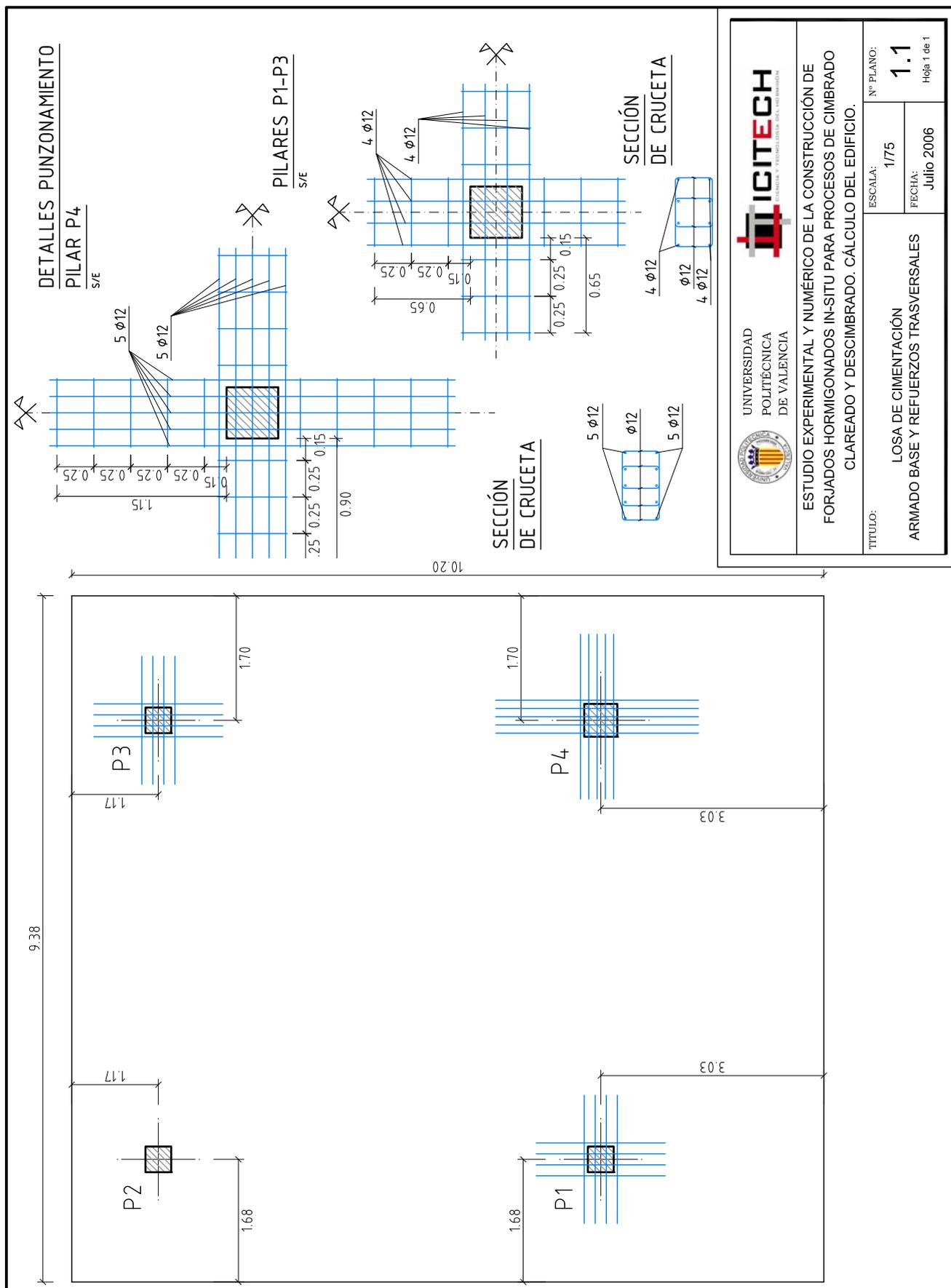
PLANO N°7: Proceso Constructivo.

PLANO N°8: Puntales Instrumentados.

8.1. Planta Baja

8.2. Primera Planta

8.3. Segunda Planta

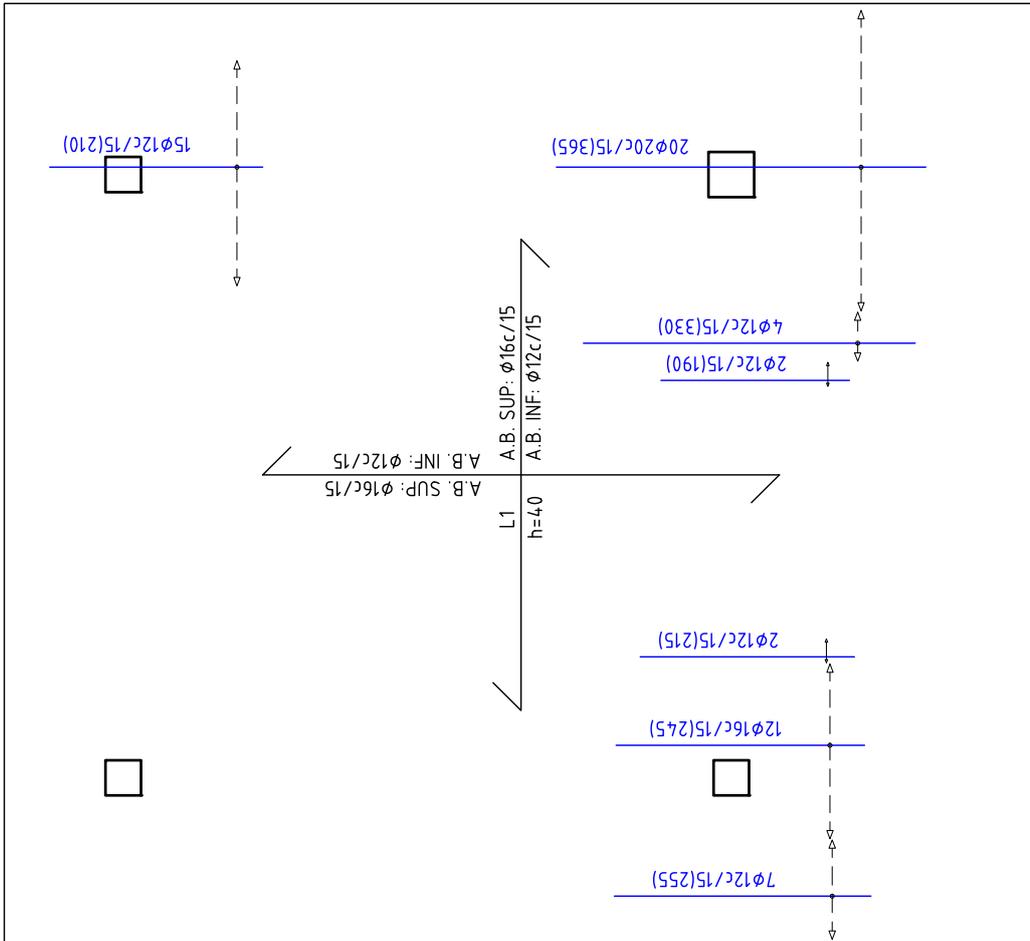
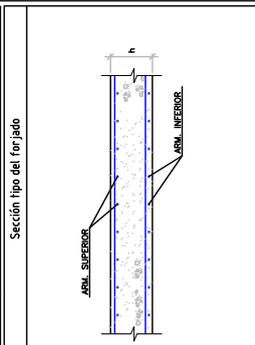


	ESCALA:	1/75	Nº PLANO: <b>1.1</b> Hoja 1 de 1
	TÍTULO:	LOSA DE CIMENTACIÓN ARMADO BASE Y REFUERZOS TRASVERSALES	
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA		FECHA:	Julio 2006
ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE LA CONSTRUCCIÓN DE FORJADOS HORMIGONADOS IN-SITU PARA PROCESOS DE CIMBRADO CLAREADO Y DESCIMBRADO. CÁLCULO DEL EDIFICIO.			

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES											
Materiales	Hormigón					Acero					
	Elemento Zona/Planta	Nivel Control	Coef. Ponde.	Control	Tipos	Consistencia	Tamaño máx. árido	Exposición Ambiente	Nivel Control	Coef. Ponde.	Tipos
Acero en armaduras									Normal	$\gamma$ s-15	B-500S
Acero estructural perfiles									Normal	$\gamma$ s-15	A42b
Forjado tipo losa de hormigón armado		Estadístico	$\gamma$ c-150	HA-25		Plancha B-70m	20 mm	I	Normal	$\gamma$ s-15	B-500S
Ejecución (Acciones)		Intruso	$\gamma$ c-135 $\gamma$ c-130				Adaptado a la Instrucción EHE / EA-95				
Exposición/ambiente		I			IIa	IIb	IIa				
Recubrimientos nominales (mm)		30	35	40	45						

Notas

- CONTROL ESTADÍSTICO EN EHE, EQUIVALE A CONTROL NORMAL
- SOLAPES SEGÚN EHE
- EL ACERO UTILIZADO DEBERÁ ESTAR GARANTIZADO CON UN DISTINTIVO RECONOCIDO: SELLO CETSID, CC-EHE, ...
- TODOS LOS DATOS RELATIVOS A LA GEOMETRÍA DE ESTE PROYECTO SE VERIFICARÁN CON LOS PLANOS DE ARQUITECTURA.
- EL ESPESOR DE LA GARGANTA DE SOLDADURAS EN ÁNGULO SERÁ IGUAL A 0.7 VECES EL ESPESOR DEL ELEMENTO MÁS DELGADO A UNIR, SALVO INDICACIÓN EN CONTRA EN LOS PLANOS.
- SE DISPONDRÁN RIGIDIZADORES EN TODOS LOS PUNTOS EN QUE HAYA UNA CARGA PUNTUAL DE MAGNITUD ELEVADA A JUICIO DE D.D... ESTOS RIGIDIZADORES NO SE HAN INDICADO, EN GENERAL, EN LOS PLANOS.
- COTAS EN M. Y CM.



NOTA: EN ESTE PLANO SOLO SE REFLEJAN LOS REFUERZOS INFERIORES YA QUE LOS REFUERZOS SUPERIORES NO SON NECESARIOS.

UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA  
DE VALENCIA

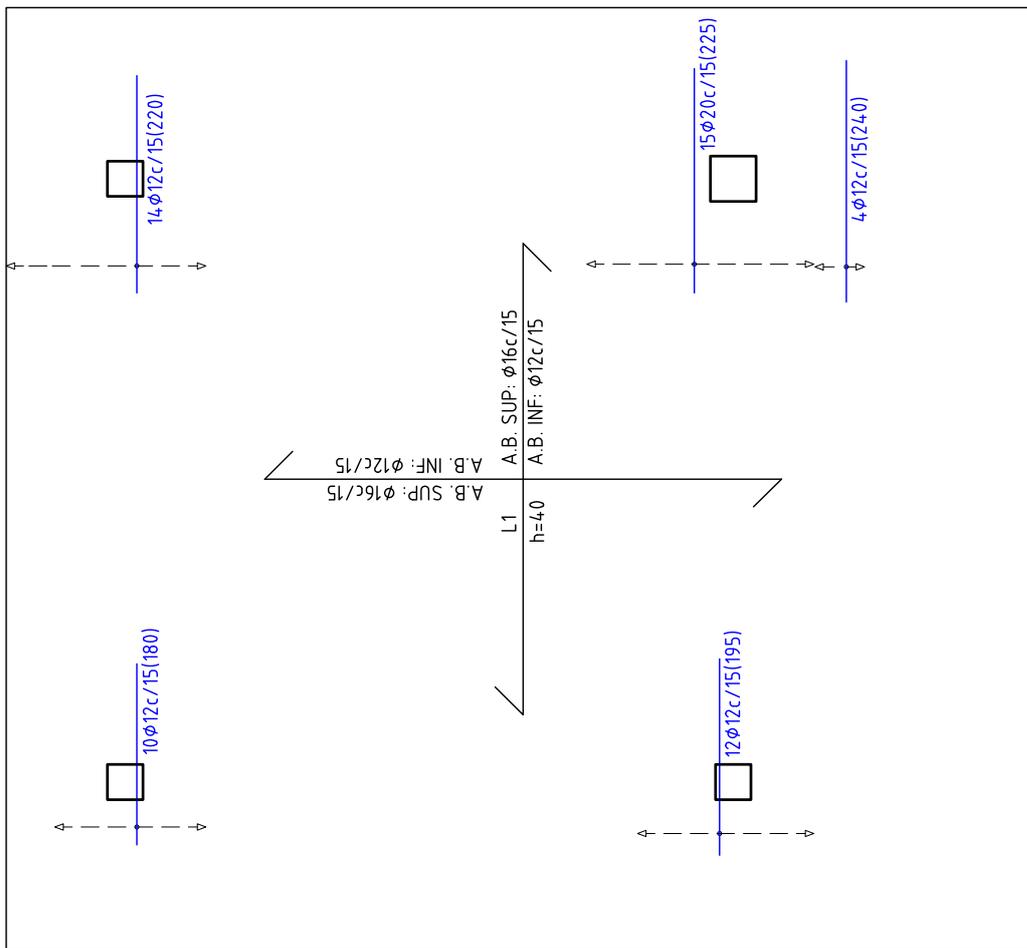
**IGITECH**

INSTRUMENTACIÓN Y TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS

---

**ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE LA CONSTRUCCIÓN DE FORJADOS HORMIGONADOS IN-SITU PARA PROCESOS DE CIMBRADO CLAREADO Y DESCIMBRADO. CÁLCULO DEL EDIFICIO.**

<b>TÍTULO:</b>	<b>ESCALA:</b>	<b>Nº PLANO:</b>
LOSA DE CIMENTACIÓN ARMADO BASE Y REFUERZOS TRASVERSALES	1/75	1.2
	<b>FECHA:</b>	Hoja 1 de 1
	Julio 2006	

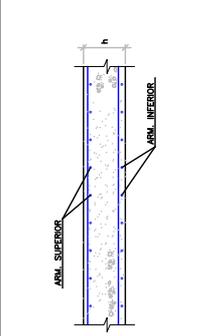


NOTA: EN ESTE PLANO SOLO SE REFLEJAN LOS REFUERZOS INFERIORES YA QUE LOS REFUERZOS SUPERIORES NO SON NECESARIOS.

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES										
Materiales		Hormigón					Acero			
Elemento Zona/Palma	Nivel Control	Control			Características		Exposición Ambiente	Nivel Control	Coef. Ponde.	Tipo
		Coef. Ponde.	Tipo	Consistencia	Tamaño máx. arido	Características				
Acero en armaduras								Normal	γ s=15	B-500S
Acero estructural perfiles								Normal	γ s=15	A42b
Forjado tipo losa de hormigón armado	Estadístico	γ c=150	HA-25	Blasto (8-9mm)	20 mm	I	Normal	γ s=15		B-500S
Ejecución (Acciones)	libre	γ c=135 γ c=150			Adaptado a la instrucción EHE / EA-95					
Exposición/ambiente	I	IIa	IIb	IIc						
Rebujamientos nominales (mm)	30	35	40	45						

Notas

- CONTROL ESTADÍSTICO EN EHE. EQUIVALE A CONTROL NORMAL
- SOLAPES SEGÚN EHE
- EL ACERO UTILIZADO DEBERÁ ESTAR GARANTIZADO CON UN DISTINTIVO RECONOCIDO: SELLO CE/SD, CC-EHE, ...
- TODOS LOS DATOS RELATIVOS A LA GEOMETRÍA DE ESTE PROYECTO SE VERIFICARÁN CON LOS PLANOS DE ARQUITECTURA.
- EL ESPESOR DE LA GARGANTA DE SOLDADURAS EN ARBOLADO SERÁ IGUAL A 1,1 VECES EL ESPESOR DEL ELEMENTO MÁS DELGADO A UNIR, SALVO INDICACION EN CONTRA EN LOS PLANOS.
- SE DISPONDRÁN RIGIDIZADORES EN TODOS LOS PUNTOS EN QUE HAYA UNA CARGA PUNTUAL DE MAGNITUD ELEVADA A JUICIO DE D.O. ESTOS RIGIDIZADORES NO SE HAN INDICADO, EN GENERAL, EN LOS PLANOS.
- COTAS EN "H" Y "C".





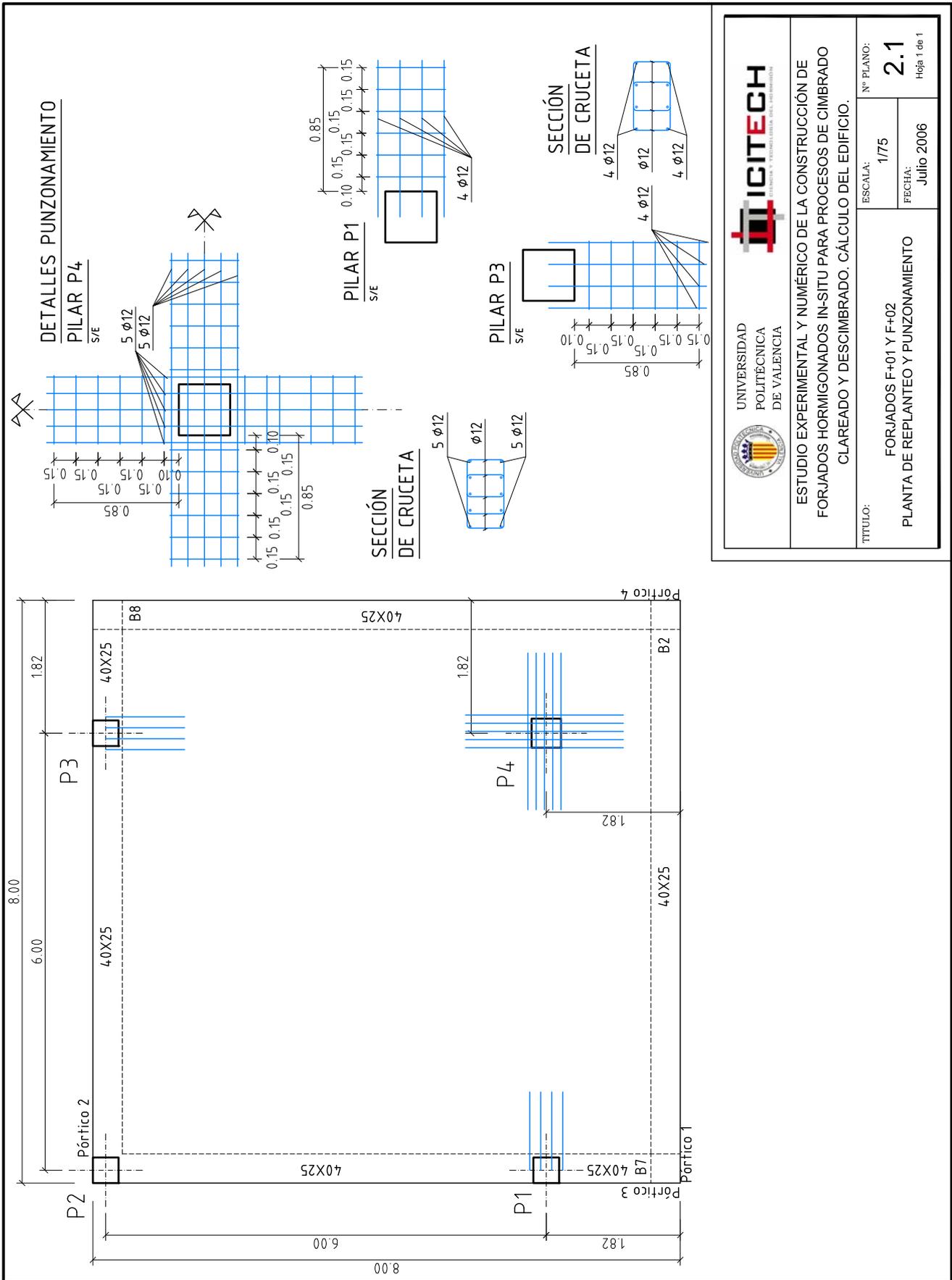
UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA  
DE VALENCIA



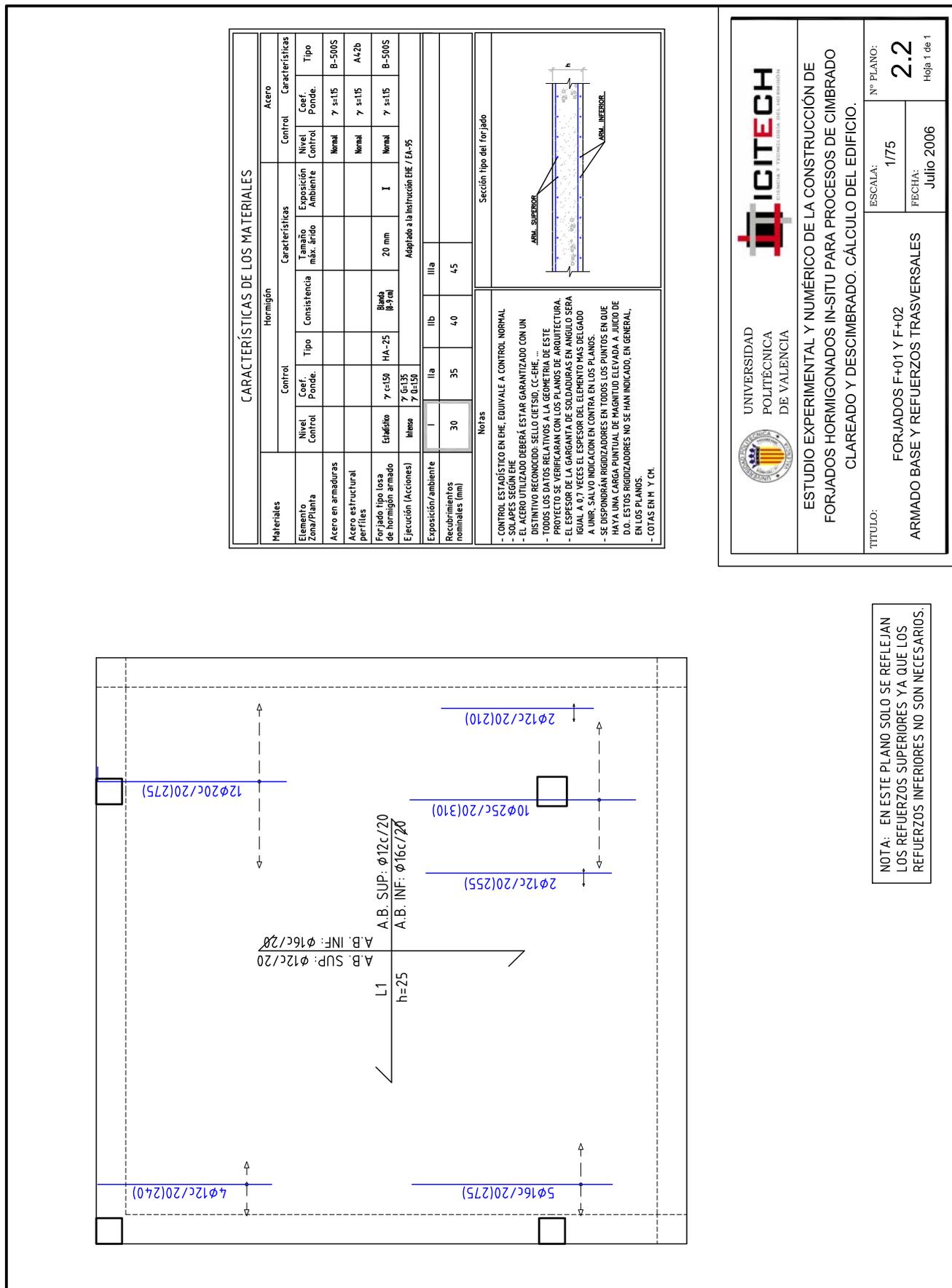
IGITECH  
INSTRUMENTACIÓN Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

**ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE LA CONSTRUCCIÓN DE FORJADOS HORMIGONADOS IN-SITU PARA PROCESOS DE CIMBRADO CLAREADO Y DESCIMBRADO. CÁLCULO DEL EDIFICIO.**

TÍTULO:	LOSA DE CIMENTACIÓN ARMADO BASE Y REFUERZOS LONGITUDINALES		
ESCALA:	1/75	ESCALA:	
FECHA:	Julio 2006	FECHA:	
Nº PLANO:	<b>1.3</b>	Nº PLANO:	
			Hoja 1 de 1



 <p>UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA</p>	 <p>IGITECH CENTRO DE INVESTIGACIONES Y TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN</p>	TÍTULO: FORJADOS F+01 Y F+02 PLANTA DE REPLANTEO Y PUNZONAMIENTO	
		ESCALA: 1/75	Nº PLANO: 2.1 Hoja 1 de 1
		FECHA: Julio 2006	

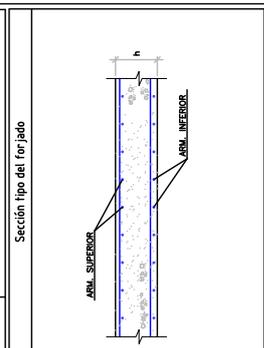


**CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES**

Materiales	Hormigón				Acero				
	Control		Características		Control		Características		
Elemento Zona/Planta	Nivel Control	Coef. Ponde.	Tipo	Consistencia	Tamaño máx. arido	Exposición Ambiente	Nivel Control	Coef. Ponde.	Tipo
Acero en armaduras							Normal	γ s=15	B-500S
Acero estructural perfiles							Normal	γ s=15	A42b
Forjado tipo losa de hormigón armado	Estadito	γ c=150	HA-25	Banda (B-9 ml)	20 mm	I	Normal	γ s=15	B-500S
Ejecución (Acciones)	libre	γ c=135 γ c=150			Adaptado a la instrucción EHE / EA-95				
Exposición/ambiente	I		IIa	IIb	IIa				
Recubrimientos nominales (mm)	30		35	40	45				

**Notas**

- CONTROL ESTADÍSTICO EN EHE. EQUIVALE A CONTROL NORMAL
- SOLAPES SEGÚN EHE
- EL ACERO UTILIZADO DEBERÁ ESTAR GARANTIZADO CON UN DISTINTIVO RECONOCIDO: SELLO DE T.S.I.D. CC-EHE. ...
- TODOS LOS DATOS RELATIVOS A LA GEOMETRÍA DE ESTE PROYECTO SE VERIFICARÁN CON LOS PLANOS DE ARQUITECTURA.
- EL ESPESOR DE LA GARGANTA DE SOLDADURAS EN ANGULO SERÁ IGUAL A 1/4 VEGES EL ESPESOR DEL ELEMENTO MÁS DELGADO A UNIR. SALVO INDICACIÓN EN CONTRA EN LOS PLANOS.
- SE DISPONDRÁN RIGIDIZADORES EN TODOS LOS PUNTOS EN QUE HAYA UNA CARGA PUNTUAL DE MAGNITUD ELEVADA A JUICIO DE D.O. ESTOS RIGIDIZADORES NO SE HAN INDICADO, EN GENERAL, EN LOS PLANOS.
- COTAS EN "H" Y "CH".

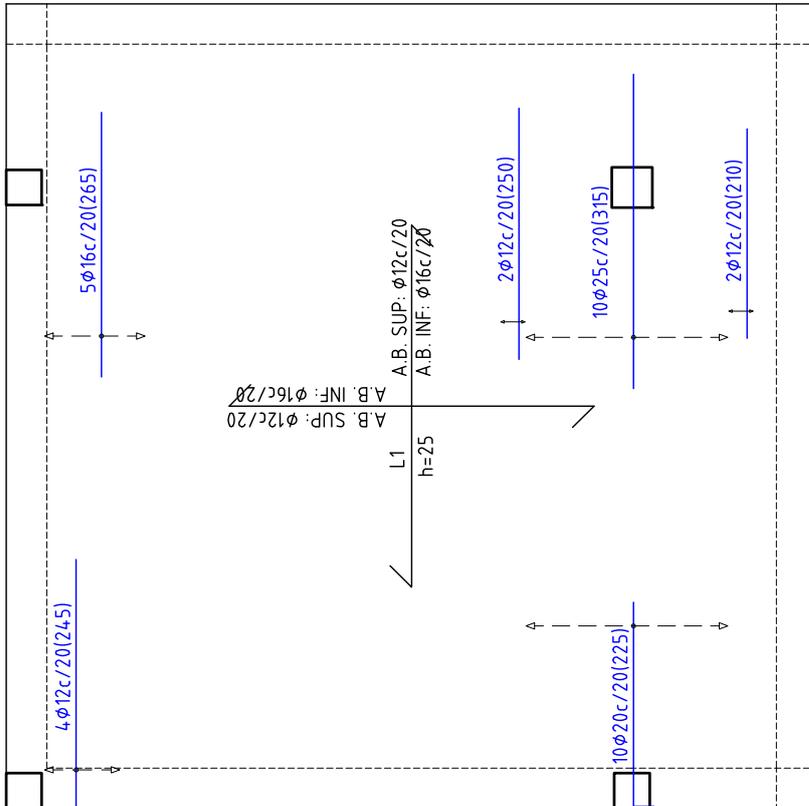


UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA  
DE VALENCIA

ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE LA CONSTRUCCIÓN DE FORJADOS HORMIGONADOS IN-SITU PARA PROCESOS DE CIMBRADO CLAREADO Y DESCIMBRADO. CÁLCULO DEL EDIFICIO.

TÍTULO:	ESCALA:	Nº PLANO:
FORJADOS F+01 Y F+02 ARMADO BASE Y REFUERZOS TRASVERSALES	1/75	2.2
	FECHA:	Hoja 1 de 1
	Julio 2006	

NOTA: EN ESTE PLANO SOLO SE REFLEJAN LOS REFUERZOS SUPERIORES YA QUE LOS REFUERZOS INFERIORES NO SON NECESARIOS.



CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES										
Materiales	Hormigón					Acero				
	Elemento Zona/Planta	Nivel Control	Coef. Ponde.	Tipo	Consistencia	Tamaño máx. árido	Exposición Ambiente	Nivel Control	Coef. Ponde.	Tipo
Acero en armaduras								Normal	$\gamma$ s-15	B-500S
Acero estructural perfiles								Normal	$\gamma$ s-15	A42b
Forjado tipo losa de hormigón armado		Estadístico	$\gamma$ c-150	HA-25		20 mm	I	Normal	$\gamma$ s-15	B-500S
Ejecución (Acciones)		Intruso	$\gamma$ c-135 $\gamma$ c-130							
Exposición/ambiente				IIa	IIb	IIIa				
Recubrimientos nominales (mm)		30	35	40	45					
Adaptado a la Instrucción EHE / EA-95										

Notas	
- CONTROL ESTADÍSTICO EN EHE, EQUIVALE A CONTROL NORMAL - SOLAPES SEGUN EHE - EL ACERO UTILIZADO DEBERÁ ESTAR GARANTIZADO CON UN DISTINTIVO RECONOCIDO: SELLO CETSID, CC-EHE, ... - TODOS LOS DATOS RELATIVOS A LA GEOMETRIA DE ESTE PROYECTO SE VERIFICARÁN CON LOS PLANOS DE ARQUITECTURA. - EL ESPESOR DE LA GARGANTA DE SOLDADURAS EN ANGULO SERÁ IGUAL A 0.7 VECES EL ESPESOR DEL ELEMENTO MAS DELGADO A UNIR, SALVO INDICACION EN CONTRA EN LOS PLANOS. - SE DISPONDRÁN RIGIDIZADORES EN TODOS LOS PUNTOS EN QUE HAYA UNA CARGA PUNTUAL DE MAGNITUD ELEVADA A JUICIO DE D.O. ESTOS RIGIDIZADORES NO SE HAN INDICADO, EN GENERAL, EN LOS PLANOS. - COTAS EN M. Y CM.	



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



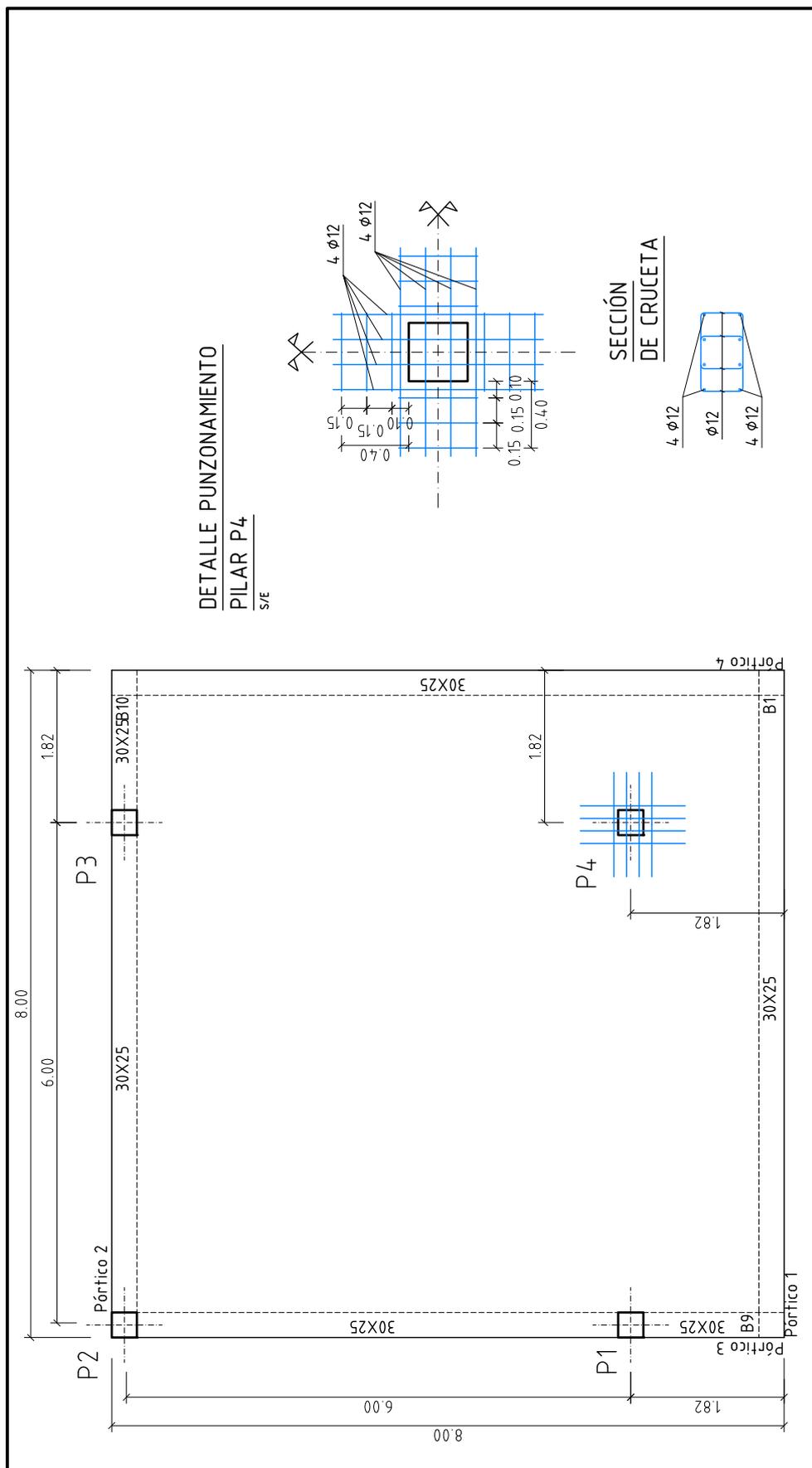
IGITECH

---

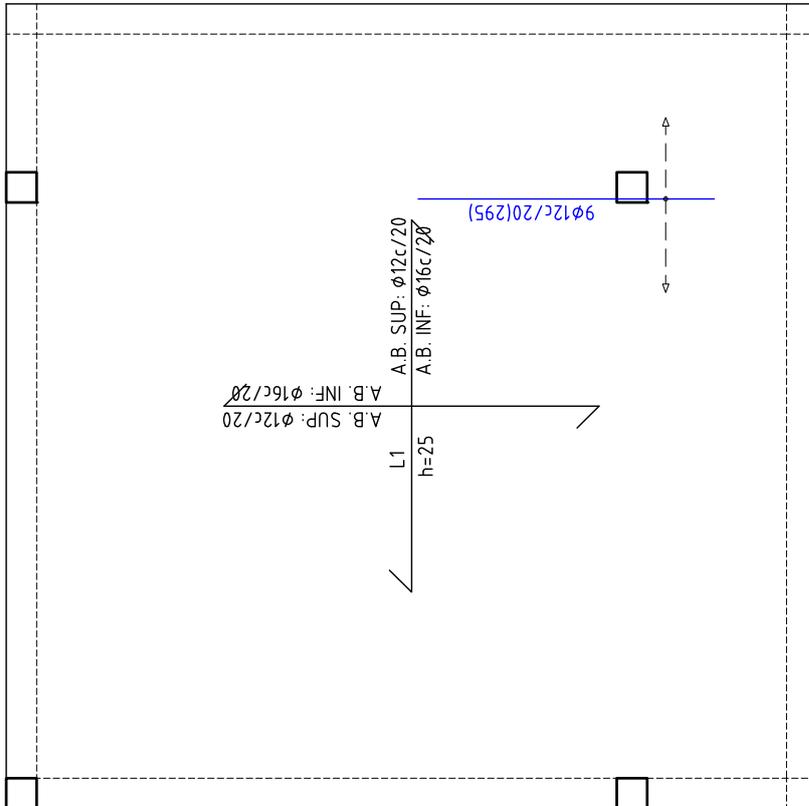
**ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE LA CONSTRUCCIÓN DE FORJADOS HORMIGONADOS IN-SITU PARA PROCESOS DE CIMBRADO CLAREADO Y DESCIMBRADO. CÁLCULO DEL EDIFICIO.**

<b>TÍTULO:</b>	<b>ESCALA:</b>	<b>Nº PLANO:</b>
FORJADOS F+01 Y F+02 ARMADO BASE Y REFUERZOS LONGITUDINALES	1/75	2.3
	<b>FECHA:</b>	Hoja 1 de 1
	Julio 2006	

NOTA: EN ESTE PLANO SOLO SE REFLEJAN LOS REFUERZOS SUPERIORES YA QUE LOS REFUERZOS INFERIORES NO SON NECESARIOS.



 UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA	 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES Y TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN	ESCALA:	1/75	Nº PLANO: <b>3.1</b> Hoja 1 de 1
		TÍTULO:	CUBIERTA PLANTA DE REPLANTEO Y PUNZONAMIENTO	
ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE LA CONSTRUCCIÓN DE FORJADOS HORMIGONADOS IN-SITU PARA PROCESOS DE CIMBRADO CLAREADO Y DESCIMBRADO. CÁLCULO DEL EDIFICIO.		FECHA:	Julio 2006	



CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES										
Materiales	Hormigón					Acero				
	Elemento Zona/Planta	Nivel Control	Coef. Ponde.	Tipo	Consistencia	Tamaño máx. árido	Exposición Ambiente	Nivel Control	Coef. Ponde.	Tipo
Acero en armaduras								Normal	γ s=15	B-500S
Acero estructural perfiles								Normal	γ s=15	A42b
Forjado tipo losa de hormigón armado	Estadístico	γ c=150	HA-25		Blanda B-70m	20 mm	I	Normal	γ s=15	B-500S
Ejecución (Acciones)	Intruso	γ c=135 γ c=130					Adaptado a la Instrucción EHE / EA-95			
Exposición/ambiente	I	IIa	IIb	IIIa						
Recubrimientos nominales (mm)	30	35	40	45						

Notas

- CONTROL ESTADÍSTICO EN EHE, EQUIVALE A CONTROL NORMAL
- SOLAPES SEGÚN EHE
- EL ACERO UTILIZADO DEBERÁ ESTAR GARANTIZADO CON UN DISTINTIVO RECONOCIDO: SELLO CETSID, CC-EHE, ...
- TODOS LOS DATOS RELATIVOS A LA GEOMETRÍA DE ESTE PROYECTO SE VERIFICARÁN CON LOS PLANOS DE ARQUITECTURA.
- EL ESPESOR DE LA GARGANTA DE SOLDADURAS EN ANGULO SERÁ IGUAL A 0.7 VECES EL ESPESOR DEL ELEMENTO MÁS DELGADO A UNIR. SALVO INDICACIÓN EN CONTRA EN LOS PLANOS.
- SE DISPONDRÁN RIGIDIZADORES EN TODOS LOS PUNTOS EN QUE HAYA UNA CARGA PUNTUAL DE MAGNITUD ELEVADA A JUICIO DE D.O. ESTOS RIGIDIZADORES NO SE HAN INDICADO, EN GENERAL, EN LOS PLANOS.
- COTAS EN M Y CM.

Sección tipo del forjado



UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA  
DE VALENCIA



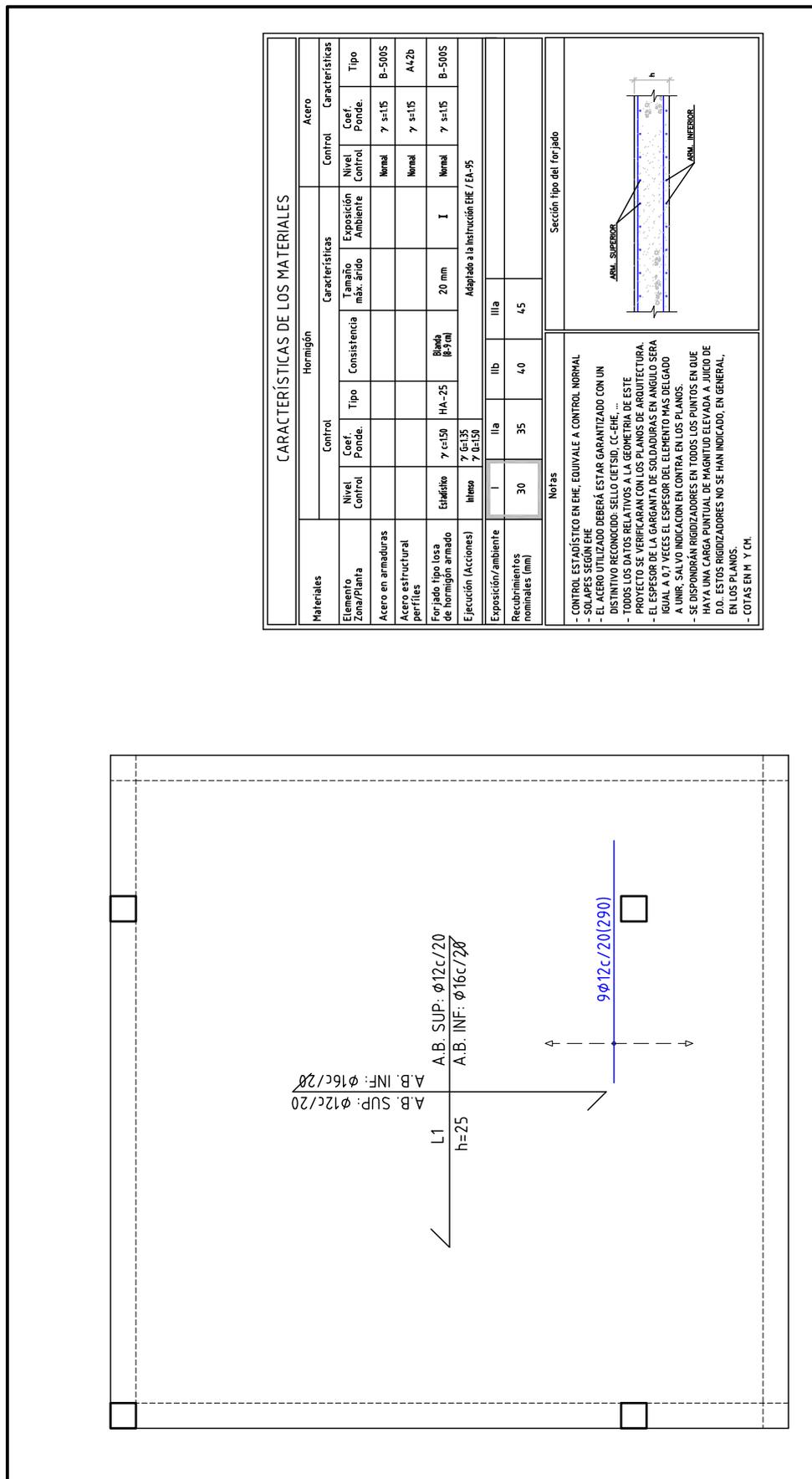
IGITECH

---

**ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE LA CONSTRUCCIÓN DE FORJADOS HORMIGONADOS IN-SITU PARA PROCESOS DE CIMBRADO CLAREADO Y DESCIMBRADO. CÁLCULO DEL EDIFICIO.**

<b>TÍTULO:</b>	<b>ESCALA:</b>	<b>Nº PLANO:</b>
CUBIERTA	1/75	3.2
ARMADO BASE Y REFUERZOS TRASVERSALES	FECHA:	Hoja 1 de 1
	Julio 2006	

NOTA: EN ESTE PLANO SOLO SE REFLEJAN LOS REFUERZOS SUPERIORES YA QUE LOS REFUERZOS INFERIORES NO SON NECESARIOS.



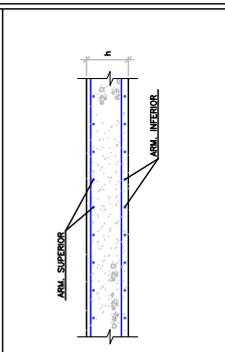
**CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES**

Materiales	Hormigón				Acero				
	Control		Características		Control		Características		
Elemento Zona/Palma	Nivel Control	Coef. Ponde.	Tipo	Consistencia	Tamaño máx. arido	Exposición Ambiente	Nivel Control	Coef. Ponde.	Tipo
Acero en armaduras							Normal	γ s=15	B-500S
Acero estructural perfiles							Normal	γ s=15	A42b
Forjado tipo losa de hormigón armado	Esfuerzo	γ c=150	HA-25	Banda (β=9mm)	20 mm	I	Normal	γ s=15	B-500S
Ejecución (Acciones)	Inteso	γ c=135 γ c=150			Adaptado a la Instrucción EHE / EA-95				
Exposición/ambiente	I		IIa	IIb	IIa				
Recubrimientos nominales (mm)	30		35	40	45				

**Notas**

- CONTROL ESTADÍSTICO EN EHE. EQUIVALE A CONTROL NORMAL
- SOLAPES SEGÚN EHE
- EL ACERO UTILIZADO DEBERÁ ESTAR GARANTIZADO CON UN DISTINTIVO RECONOCIDO: SELLO DE T.S.D. CC-EHE. ...
- TODOS LOS DATOS RELATIVOS A LA GEOMETRÍA DE ESTE PROYECTO SE VERIFICARÁN CON LOS PLANOS DE ARQUITECTURA.
- EL ESPESOR DE LA GARGANTA DE SOLDADURAS EN ANGULO SERÁ IGUAL A 0,1 VECES EL ESPESOR DEL ELEMENTO MÁS DELGADO A UNIR. SALVO INDICACIÓN EN CONTRA EN LOS PLANOS.
- SE DISPONDRÁN RIGIDIZADORES EN TODOS LOS PUNTOS EN QUE HAYA UNA CARGA PUNTUAL DE MAGNITUD ELEVADA A JUICIO DE D.O. ESTOS RIGIDIZADORES NO SE HAN INDICADO, EN GENERAL, EN LOS PLANOS.
- COTAS EN "H" Y "CH".

**Sección tipo del forjado**





UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA  
DE VALENCIA

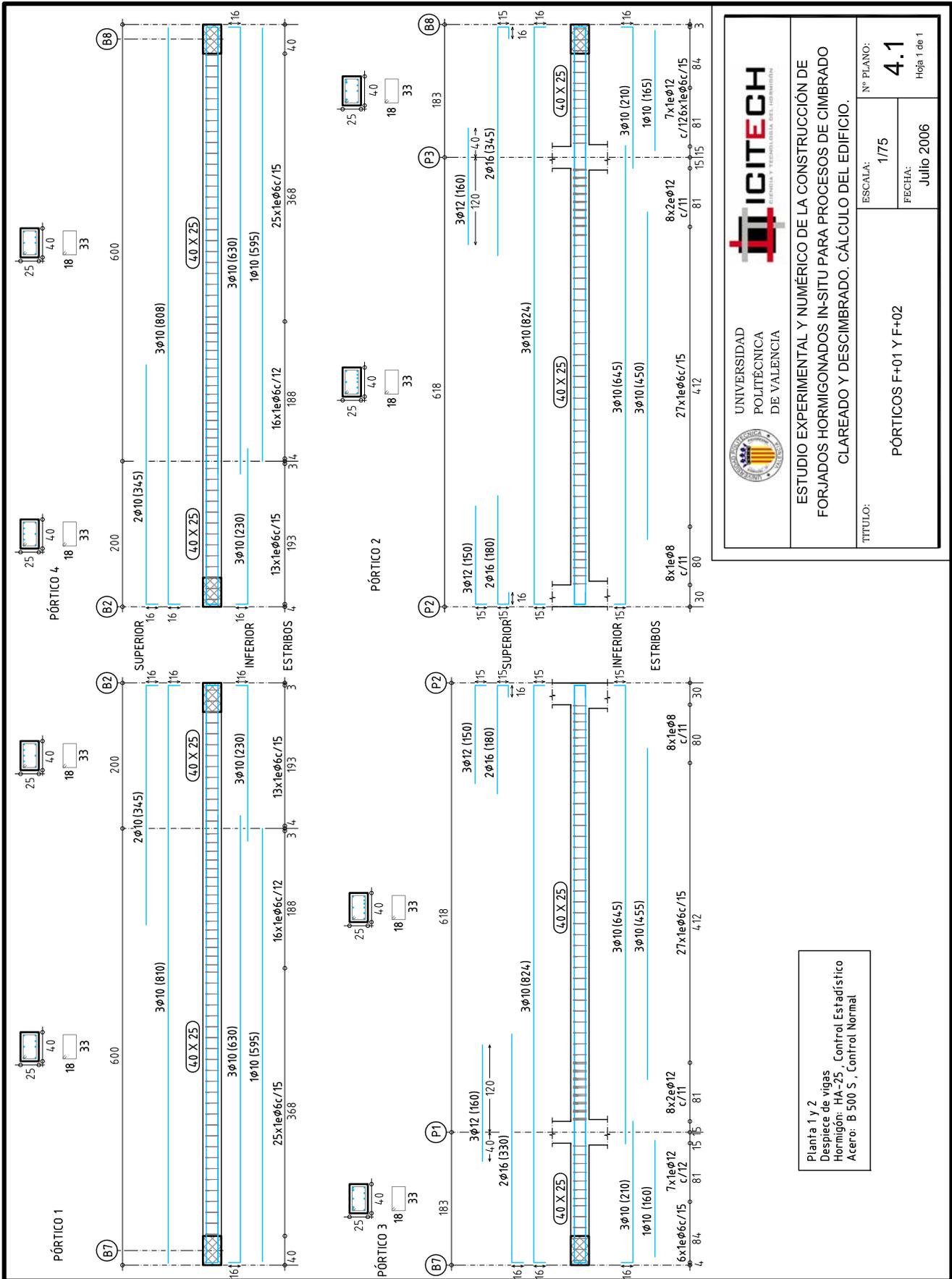


IGITECH  
INSTRUMENTACIÓN Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

**ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE LA CONSTRUCCIÓN DE FORJADOS HORMIGONADOS IN-SITU PARA PROCESOS DE CIMBRADO CLAREADO Y DESCIMBRADO. CÁLCULO DEL EDIFICIO.**

TÍTULO:	CUBIERTA ARMADO BASE Y REFUERZOS LONGITUDINALES	
ESCALA:	1/75	Nº PLANO: <b>3.3</b> Hoja 1 de 1
FECHA:	Julio 2006	

NOTA: EN ESTE PLANO SOLO SE REFLEJAN LOS REFUERZOS SUPERIORES YA QUE LOS REFUERZOS INFERIORES NO SON NECESARIOS.





UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA  
DE VALENCIA

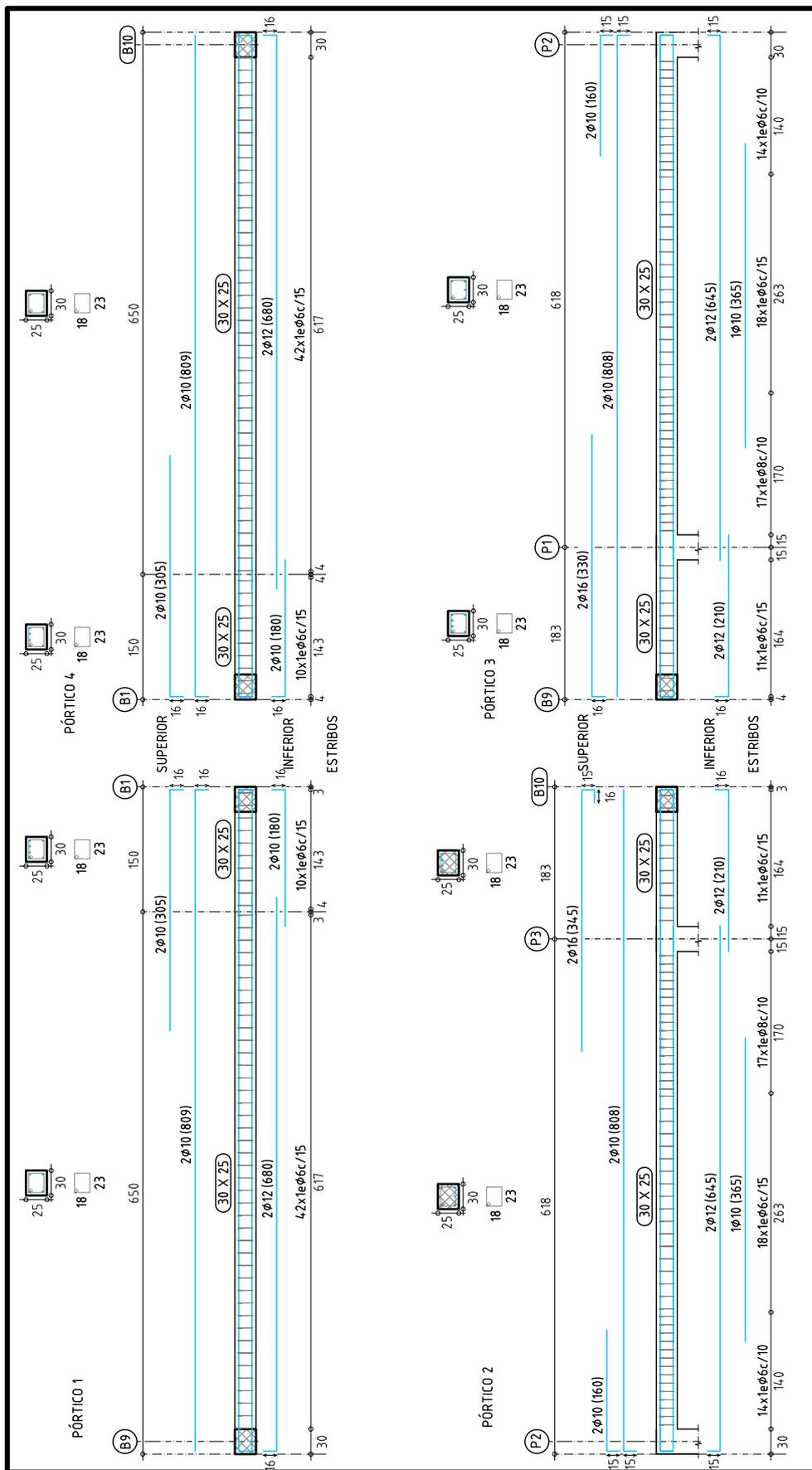


IGITECH  
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN

ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE LA CONSTRUCCIÓN DE  
FORJADOS HORMIGONADOS IN-SITU PARA PROCESOS DE CIMBRADO  
CLAREADO Y DESCIMBRADO. CÁLCULO DEL EDIFICIO.

TÍTULO: <b>PÓRTICOS F+01 Y F+02</b>	ESCALA: 1/75	Nº PLANO: <b>4.1</b>
FECHA: Julio 2006		Hoja 1 de 1

Planta 1 y 2  
Despiece de vigas  
Hormigón: HA-25, Control Estadístico  
Acero: B 500 S, Control Normal





UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA  
DE VALENCIA



IGITECH  
INSTRUMENTACIÓN Y TECNOLÓGICA DE CONSTRUCCIÓN

ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE LA CONSTRUCCIÓN DE  
FORJADOS HORMIGONADOS IN-SITU PARA PROCESOS DE CIMBRADO  
CLAREADO Y DESCIMBRADO. CÁLCULO DEL EDIFICIO.

PÓRTICOS CUBIERTA	ESCALA: 1/75	Nº PLANO: <b>4.2</b> Hoja 1 de 1
TÍTULO:	FECHA: Julio 2006	

Cubierta  
Despiece de vigas  
Hormigón: HA-25, Control Estadístico  
Acero: B 500 S, Control Normal

Resumen Acero Forjados 1 a 3 Pilares	Long. total (m)	Peso+10% (Kg)	Total
B 500 S, CN $\phi 6$	108.5	26	
$\phi 8$	329.6	14.3	
$\phi 16$	81.8	14.2	
$\phi 20$	47.2	128	
$\phi 25$	151.8	64.4	1083

Cuadro de pilares  
 Hormigón: HA-25, Control Estadístico  
 Acero: B 500 S, Control Normal

CUBIERTA	P1	P2	P3	P4
	6 $\phi 16$ 2 $\phi 20$ 25 $\phi 6c/20$	4 $\phi 16$ 25 $\phi 6c/20$	6 $\phi 16$ 25 $\phi 6c/20$	4 $\phi 20$ 25 $\phi 6c/20$
PLANTA 2				
	4 $\phi 25$ 2 $\phi 20$ 24 $\phi 8c/25$			
PLANTA 1				
	4 $\phi 25$ 2 $\phi 20$ 24 $\phi 8c/25$			
CIMENTACIÓN				
	4 $\phi 25$ 2 $\phi 20$ 24 $\phi 8c/25$			



UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA  
DE VALENCIA



ICITECH  
INICIATIVA Y TECNOLOGÍA DEL CONCRETO

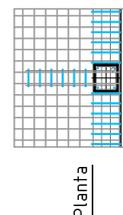
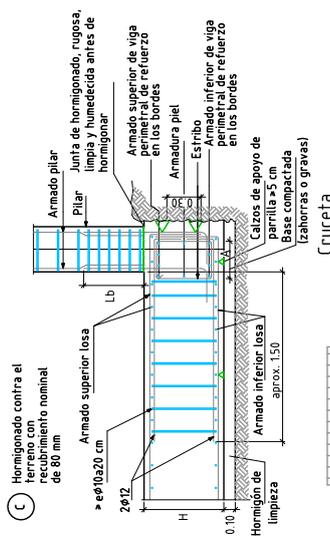
---

**ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE LA CONSTRUCCIÓN DE FORJADOS HORMIGONADOS IN-SITU PARA PROCESOS DE CIMBRADO CLAREADO Y DESCIMBRADO. CÁLCULO DEL EDIFICIO.**

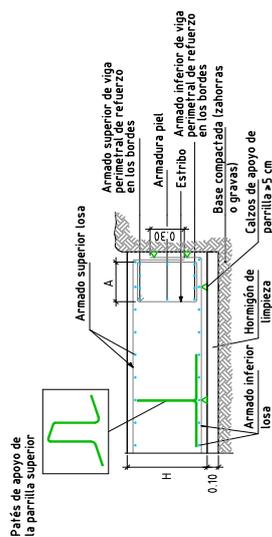
---

TÍTULO: <b>CUADRO DE PILARES</b>	ESCALA: 1/75	Nº PLANO: <b>5</b>
	FECHA: Julio 2006	Hoja 1 de 1

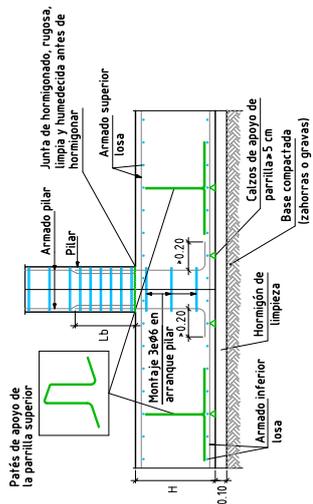
**Pilar central con refuerzo a punzonamiento  
Cruceatas estribadas.  
Hormigonado contra el terreno.**



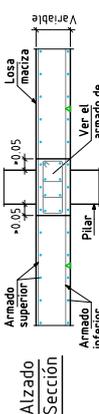
**Viga perimetral de borde.**



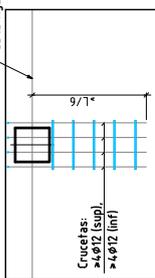
**Pilar central**



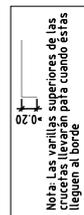
**Armadura de montaje de ábaco de medianería con pilar de hormigón.**



**Alzado Sección**

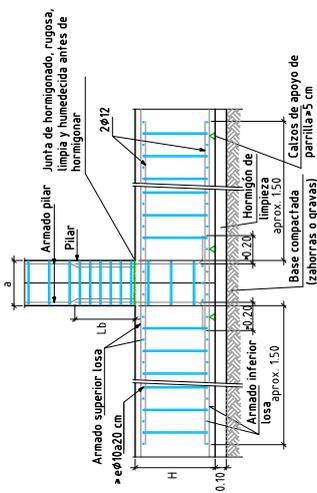


**Planta**

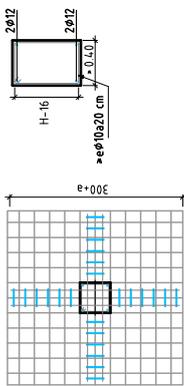


Nota: Las varillas superiores de las cruceatas deben estar en posición para cuando éstas lleguen al borde.

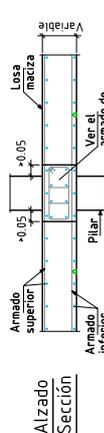
**Pilar central con refuerzo a punzonamiento.  
Cruceatas estribadas.**



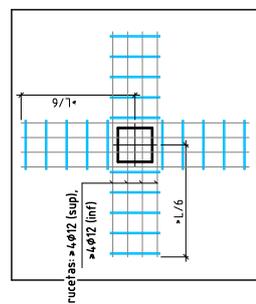
**Esquema disposición en cruz en planta**



**Armadura de montaje de ábaco central con pilar de hormigón**



**Alzado Sección**



**Planta**



Nota: L = longitud entre pilares adyacentes

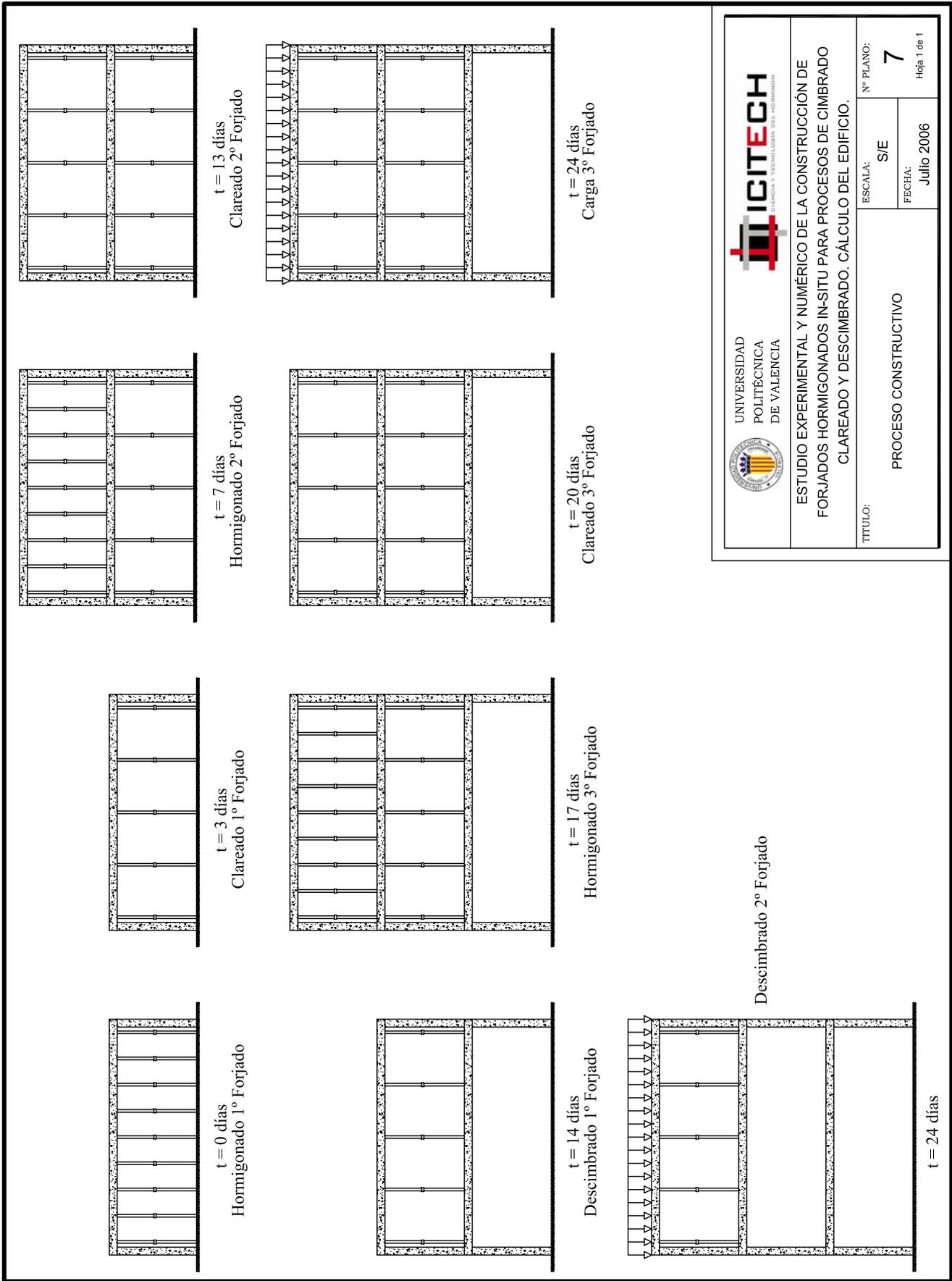


UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

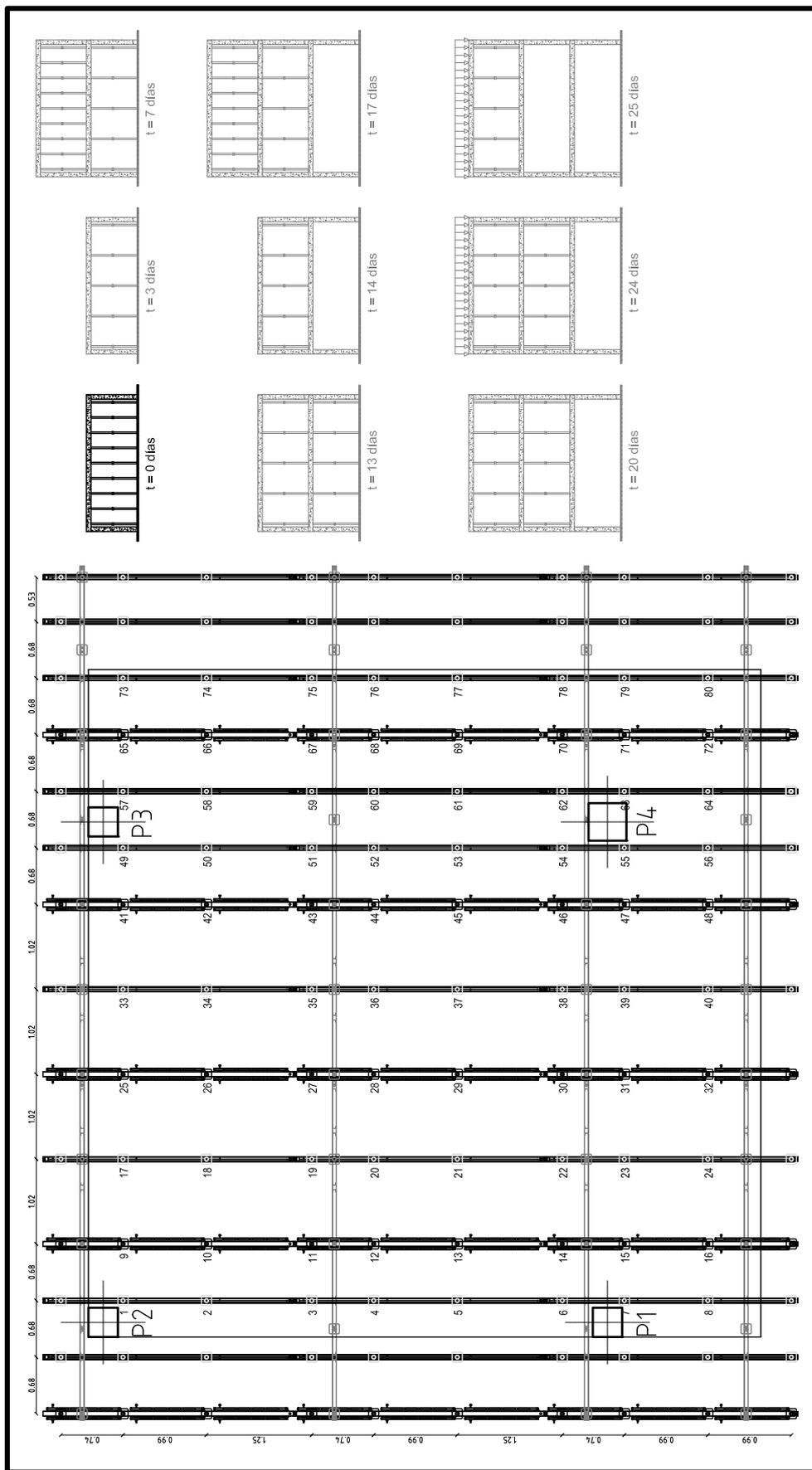


**ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE LA CONSTRUCCIÓN DE FORJADOS HORMIGONADOS IN-SITU PARA PROCESOS DE CIMBRADO CLAREADO Y DESCIMBRADO. CÁLCULO DEL EDIFICIO.**

TÍTULO:	ESCALA: S/E
DETALLES	FECHA: Julio 2006
Nº PLANO: <b>6</b>	
Hoja 1 de 1	

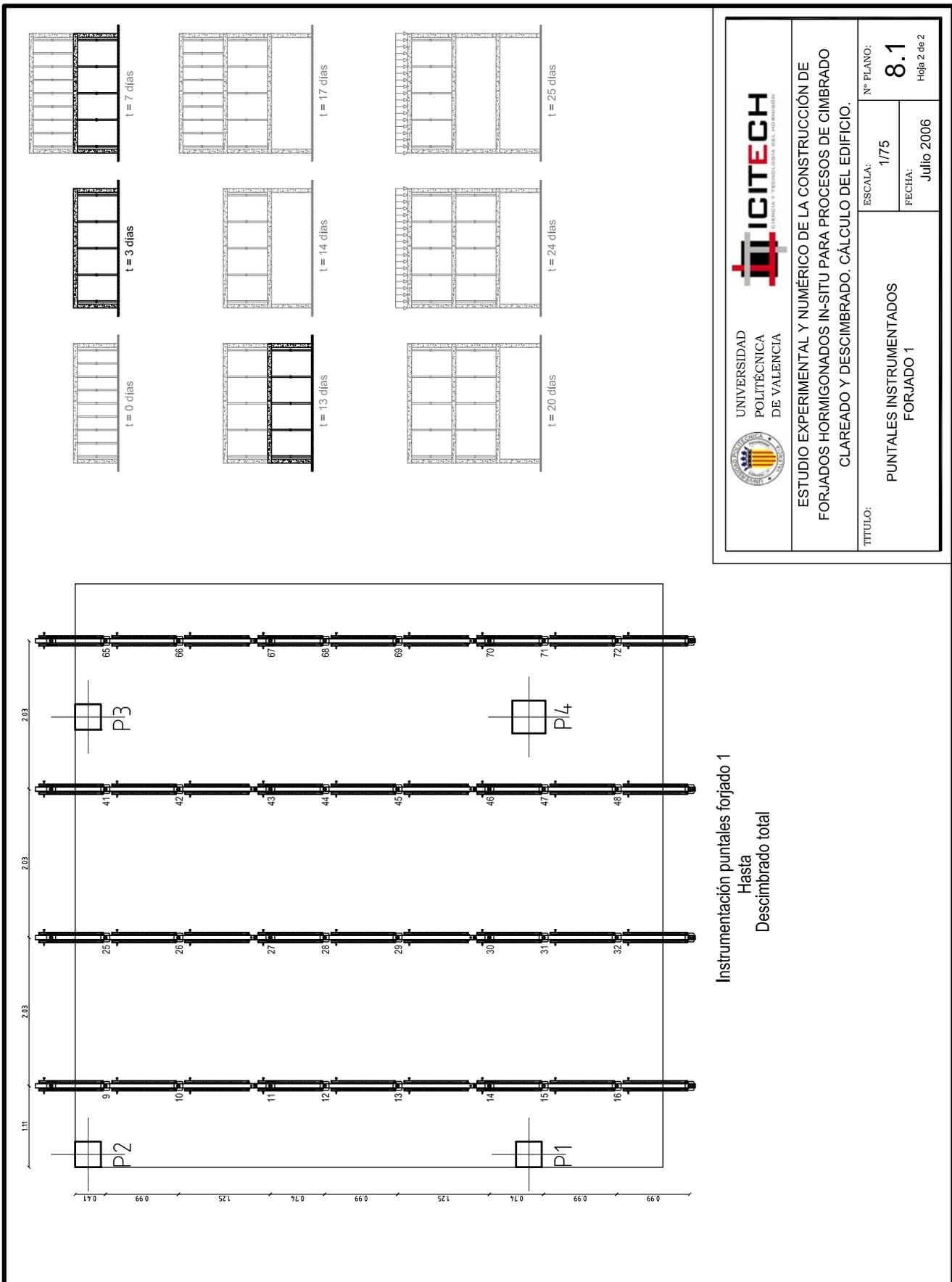


 <p>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA</p>	 <p>ICITECH</p>	ESCALA: S/E	Nº PLANO: 7
		FECHA: Julio 2006	Hoja 1 de 1
<p>TÍTULO: PROCESO CONSTRUCTIVO</p>		<p>ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE LA CONSTRUCCIÓN DE FORJADOS HORMIGONADOS IN-SITU PARA PROCESOS DE CIMBRADO CLAREADO Y DESCIMBRADO. CÁLCULO DEL EDIFICIO.</p>	



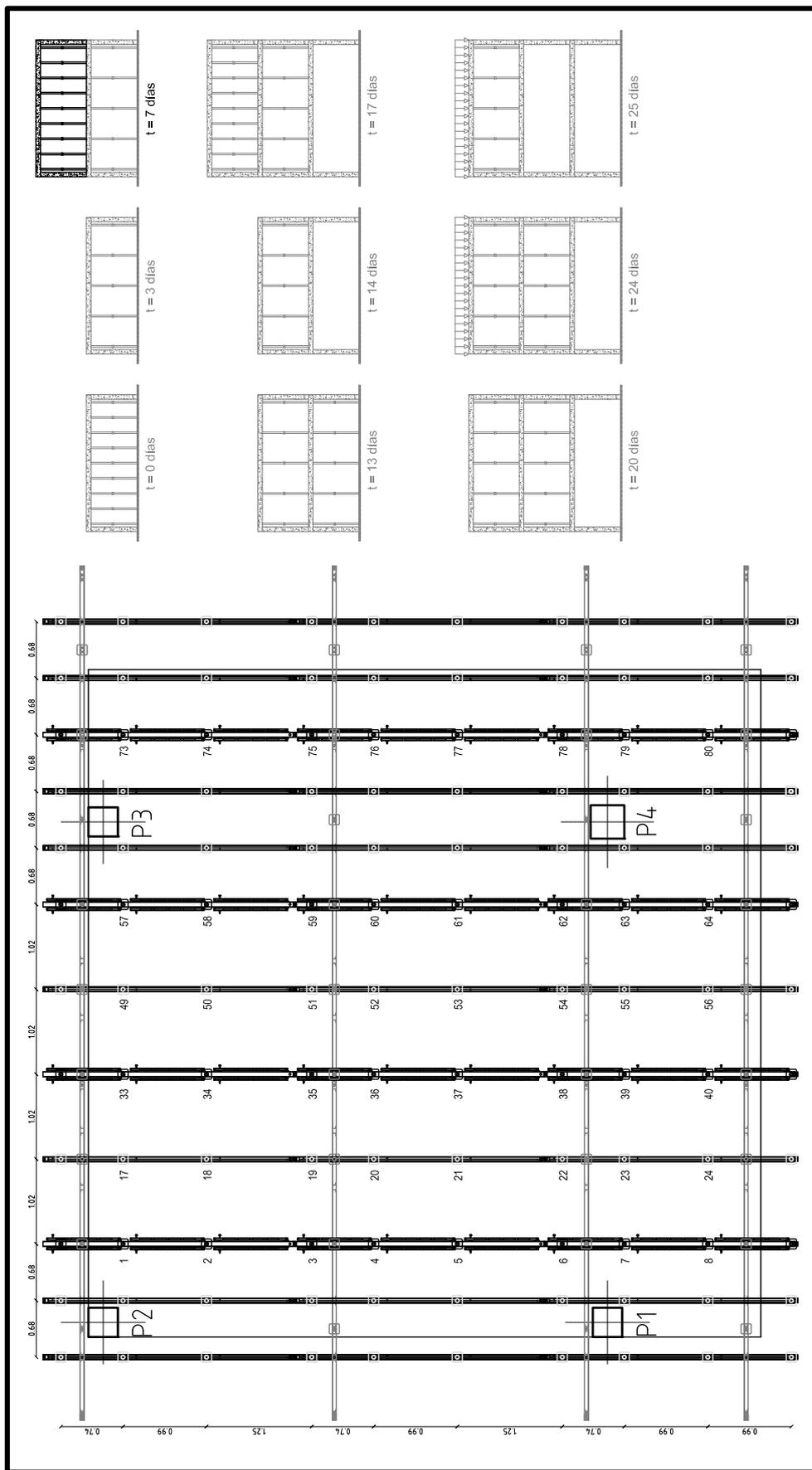
Instrumentación puntales forjado 1

 UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA	 IGITECH <small>INSTRUMENTACIÓN Y GESTIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN</small>	ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE LA CONSTRUCCIÓN DE FORJADOS HORMIGONADOS IN-SITU PARA PROCESOS DE CIMBRADO CLAREADO Y DESCIMBRADO. CÁLCULO DEL EDIFICIO.	
		TÍTULO: PUNTALES INSTRUMENTADOS FORJADO 1	ESCALA: 1/75
		FECHA: Julio 2006	Hoja 1 de 2



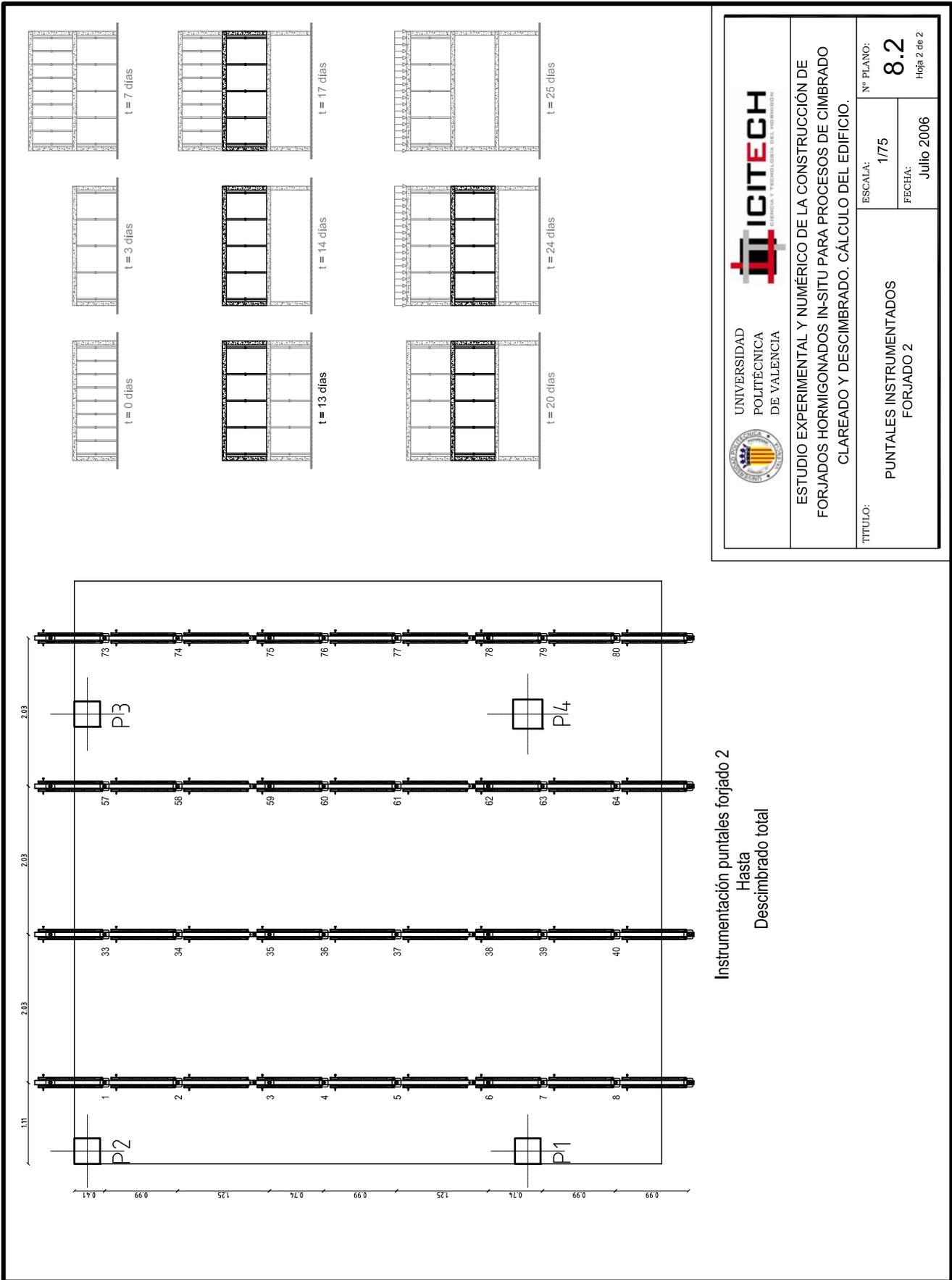
Instrumentación puntales forjado 1  
Hasta  
Descimbrado total

 <p>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA</p>	 <p>ICITECH CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN</p>	Nº PLANO: <b>8.1</b> Hojas 2 de 2
		ESCALA: 1/75 FECHA: Julio 2006
TÍTULO: PUNTALES INSTRUMENTADOS FORJADO 1		

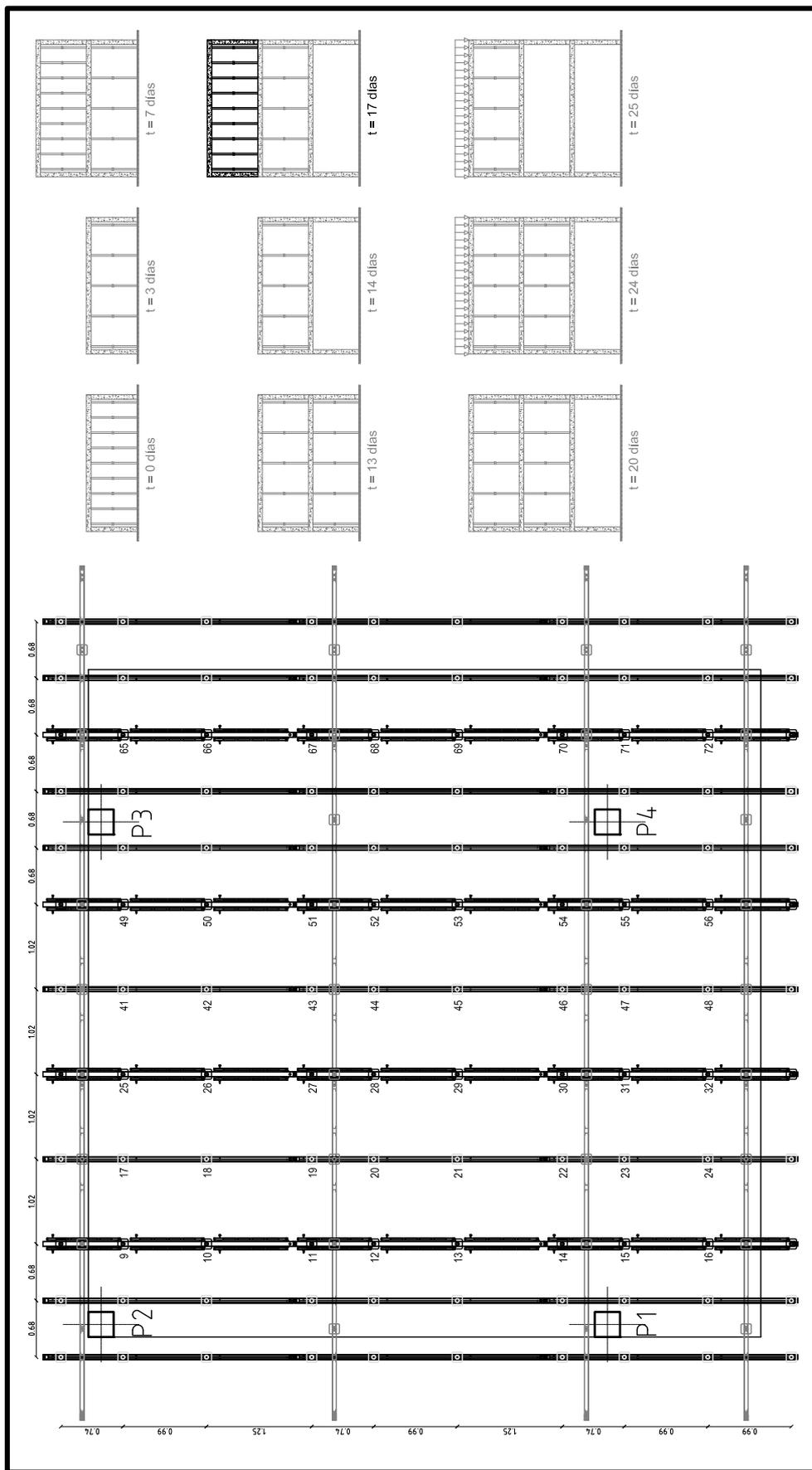


Instrumentación puntales forjado 2

 UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA	 IGITECH <small>INSTRUMENTACIÓN Y GESTIÓN TECNOLÓGICA DEL CONCRETO</small>	ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE LA CONSTRUCCIÓN DE FORJADOS HORMIGONADOS IN-SITU PARA PROCESOS DE CIMBRADO CLAREADO Y DESCIMBRADO. CÁLCULO DEL EDIFICIO.	
		TÍTULO: PUNTALES INSTRUMENTADOS FORJADO 2	ESCALA: 1/75
		FECHA: Julio 2006	Hoja 1 de 2

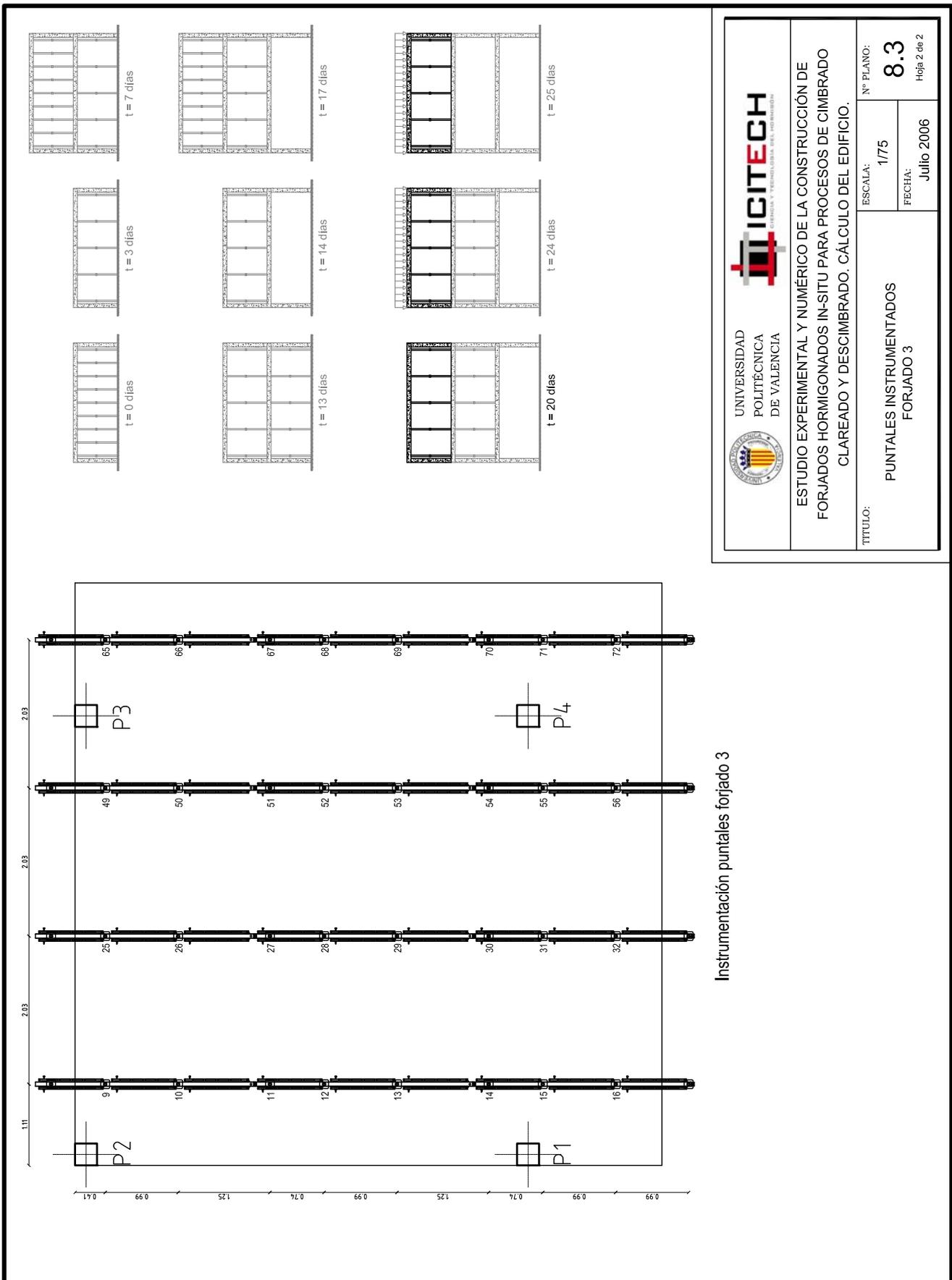


 <p>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA</p>	 <p>ICITECH CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN</p>	Nº PLANO: <b>8.2</b> Hoja 2 de 2	
		ESCALA: 1/75	FECHA: Julio 2006
TÍTULO: PUNTALES INSTRUMENTADOS FORJADO 2		ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE LA CONSTRUCCIÓN DE FORJADOS HORMIGONADOS IN-SITU PARA PROCESOS DE CIMBRADO CLAREADO Y DESCIMBRADO. CÁLCULO DEL EDIFICIO.	



Instrumentación puntales forjado 3

 UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA	 IGITECH <small>INSTRUMENTACIÓN Y GESTIÓN TECNOLÓGICA DEL CONCRETO</small>	ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE LA CONSTRUCCIÓN DE FORJADOS HORMIGONADOS IN-SITU PARA PROCESOS DE CIMBRADO CLAREADO Y DESCIMBRADO. CÁLCULO DEL EDIFICIO.	
		TÍTULO: PUNTALES INSTRUMENTADOS FORJADO 3	ESCALA: 1/75
		FECHA: Julio 2006	Hoja 1 de 2



Instrumentación puntales forjado 3

## APÉNDICE II. REGISTRO FOTOGRAFICO DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

### II.1. Introducción

La construcción del edificio experimental se inició el 30 de octubre de 2006 con el replanteo de la losa de cimentación y finalizó el 26 de diciembre de 2006 con el descimbrado del tercer forjado. La medición de cargas en el sistema de apuntalamiento, se inició el 28 de noviembre de 2006, correspondiente al hormigonado del primer forjado, y terminó el 23 de diciembre de 2006, correspondiente al descimbrado del segundo forjado.

En el presente apéndice se muestra un registro fotográfico de las diferentes fases del estudio experimental.

### II.2. Registro fotográfico

#### II.2.1. Cartel informativo



Fig. II.1 Cartel informativo instalado en el emplazamiento del edificio experimental

## **II.2.2. Cimentación**



Fig. II.2 Hormigón de limpieza y replanteo de la cimentación (14/11/2006)



Fig. II.3 Hormigonado de la losa de cimentación (16/11/2006)

### ***II.2.3. Pilares del forjado 1***



Fig. II.4 Hormigonado de los pilares del primer forjado (17/11/2006)

### ***II.2.4. Instalación del sistema de cimbrado forjado 1***



Fig. II.5 Instalación del sistema de cimbrado del forjado 1 (20/11/2006)



Fig. II.6 Sistema de cimbrado forjado 1 (22/11/2006)

### ***II.2.5. Armado del forjado 1***



Fig. II.7 Armado del forjado 1 (22/11/2006)

### II.2.6. Instrumentación de puntales del forjado 1



Fig. II.8 Disposición de cables en cada uno de los puntales instrumentados (24/11/2006)



Fig. II.9 Cables para la recopilación de datos (24/11/2006)



Fig. II.10 Caseta con los equipos de adquisición de datos (24/11/2006)



Fig. II.11 Equipos de adquisición de datos (27/11/2006)

### II.2.7. Hormigonado del forjado 1

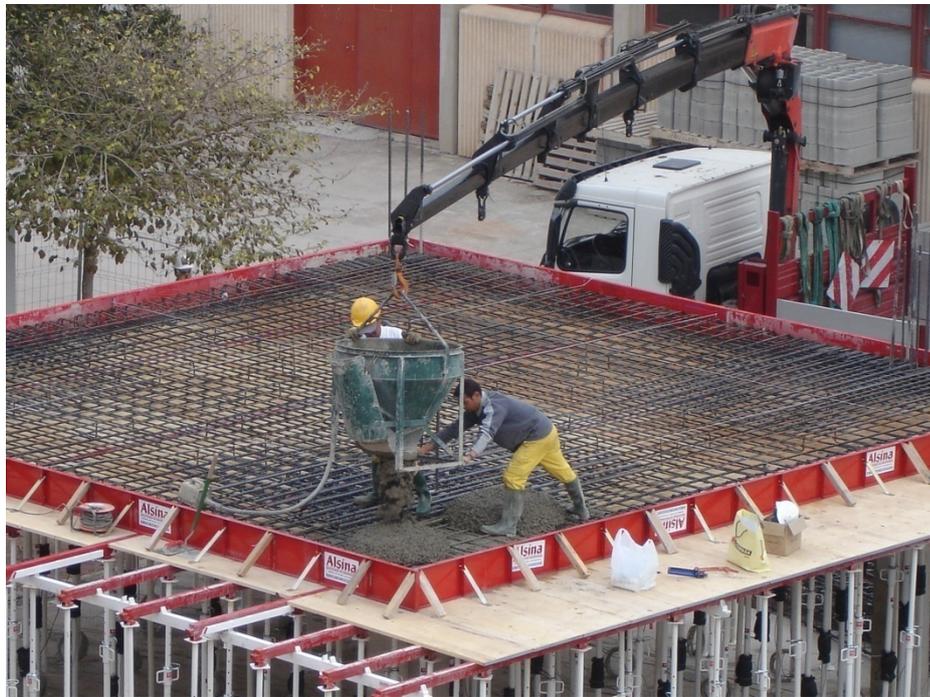


Fig. II.12 Hormigonado del forjado 1 (28/11/2006)



Fig. II.13 Instalación de termopares en el hormigón del forjado 1 (28/11/2006)



Fig. II.14 Probetas de hormigón curadas en las mismas condiciones que el forjado 1 (28/11/2006)



Fig. II.15 Hormigonado del forjado 1 (28/11/2006)

### ***II.2.8. Pilares forjado2***



Fig. II.16 Montaje del encofrado de los pilares del forjado 2 (29/11/2006)

### ***II.2.9. Instalación del sistema de cimbrado del forjado 2***



Fig. II.17 Instalación del sistema de cimbrado del forjado 2 (30/11/2006)

***II.2.10. Clareado del forjado 1***



Fig. II.18 Clareado del forjado 1 (01/12/2006)



Fig. II.19 Clareado del forjado 1 (01/12/2006)

**II.2.11. Armado del forjado 2**



Fig. II.20 Armado del forjado 2 (04/12/2006)

**II.2.12. Hormigonado del forjado 2**



Fig. II.21 Hormigonado del forjado 2 (05/12/2006)



Fig. II.22 Hormigonado del forjado 2 (05/12/2006)



Fig. II.23 Curado del forjado 2 (05/12/2006)

### ***II.2.13. Hormigonado de los pilares del forjado 3***



Fig. II.24 Hormigonado de los pilares del forjado 3 (11/12/2006)

### ***II.2.14. Clareado del forjado 2***



Fig. II.25 Clareado del forjado 2 (11/12/2006)



Fig. II.26 Clareado del forjado 2 (11/12/2006)

### ***II.2.15. Descimbrado del forjado 1***



Fig. II.27 Descimbrado del forjado 1 (12/12/2006)



Fig. II.28 Descimbrado del forjado 1 (12/12/2006)

### ***II.2.16. Instalación del sistema de cimbrado del forjado 3***



Fig. II.29 Instalación del sistema de cimbrado del forjado 3 (13/12/2006)

### ***II.2.17. Armado del forjado 3***



Fig. II.30 Armado del forjado 3 (14/12/2006)

### ***II.2.18. Hormigonado del forjado 3***



Fig. II.31 Hormigonado del forjado 3 (15/12/2006)



Fig. II.32 Hormigonado del forjado 3 (15/12/2006)

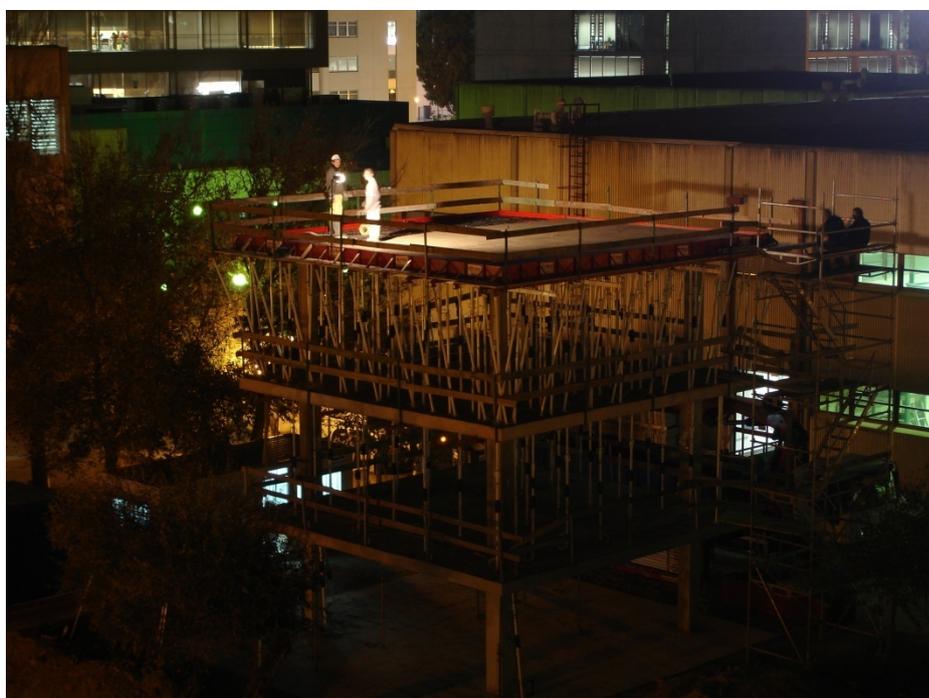


Fig. II.33 Hormigonado del forjado 3 (15/12/2006)

### ***II.2.19. Clareado del forjado 3***



Fig. II.34 Clareado del forjado 3 (18/12/2006)



Fig. II.35 Manipulación del basculante de las sopandas principales durante la operación de clareado (18/12/2006)



Fig. II.36 Clareado del forjado 3 (18/12/2006)

### ***II.2.20. Carga en el forjado 3***



Fig. II.37 Instalación de balsas plásticas para aplicar la carga en el forjado 3 (21/12/2006)



Fig. II.38 Balsas plásticas para aplicar la carga en el forjado 3 (21/12/2006)



Fig. II.39 Llenado del las balsas plásticas para aplicar la carga en el forjado 3 (22/12/2006)



Fig. II.40 Aplicación de la carga en el forjado 3 (22/12/2006)

### ***II.2.21. Descimbrado forjado 2***



Fig. II.41 Descimbrado del forjado 2 (23/12/2006)



Fig. II.42 Descimbrado del forjado 2 (23/12/2006)

### ***II.2.22. Descimbrado del forjado 3***



Fig. II.43 Descimbrado del forjado 3 (26/12/2006)

## APÉNDICE III. DEFORMACIONES EN LOS FORJADOS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL

### III.1. Introducción

Durante el desarrollo del estudio experimental (descrito en el Capítulo III) se instalaron captadores de desplazamiento (LVDTs) dispuestos bajo los forjados 1 y 2, con el objetivo de conocer las deformaciones de cada uno de éstos durante el proceso constructivo de CCD.

En el presente Apéndice se describe la ubicación y el sistema empleado para instalar los LVDTs y se comentan las medidas obtenidas.

### III.2. Sistema de medición empleado

Para medir las deformaciones del forjado se instalaron LVDTs dispuestos en pértigas que se ajustan entre los forjados y miden el desplazamiento vertical de estos. La Figura III.1 (a) muestra la pértiga instalada entre los forjados 1 y 2.

Los LVDTs empleados en la medición son sensores de desplazamiento de línea del tipo potenciométrico marca Penny & Gilles, con muelle de retorno y de 50 mm de rango (véase Figura III.1 (b)).

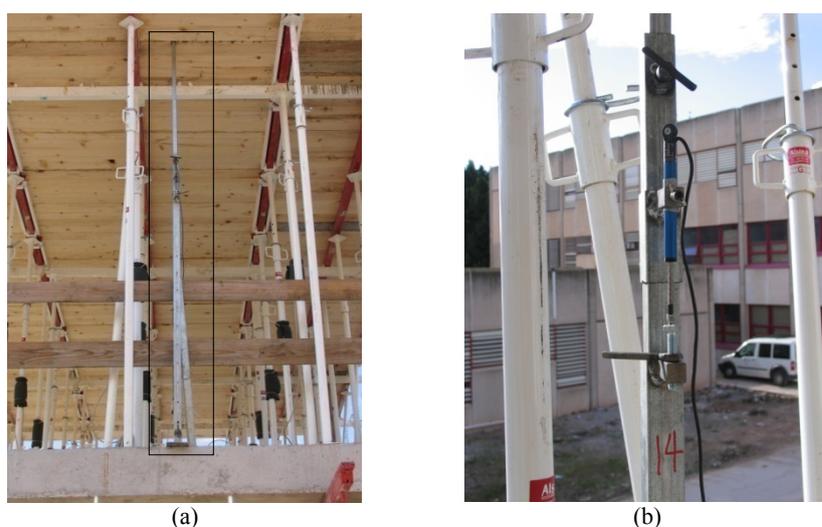


Fig. III.1 Deformación de los forjados (a) Pértiga instalada entre los forjados 1 y 2 (b) LVDT instalado en la pértiga

El sistema de adquisición de datos empleado para la lectura y almacenamiento de los datos suministrados por los LVDTs, consistió en 2 módulos marca NATIONAL INSTRUMENTS, con referencia AI-110, que permitieron la lectura del 14 LVDTs simultáneamente.

### III.3. Deformación de los forjados

En el presente apartado se detallan las deformaciones de cada uno de los forjados instrumentados, desde el momento de instalación de las pértigas bajo cada uno de estos. Las pértigas se instalaron en los puntos que se muestran en la Figura III.2 para los dos forjados. La ubicación línea de pértigas 1-5 se encontraba muy próxima a una sopanda intermedia que sería retirada durante la operación de clareado. Además se esperaba que en dicha línea se presentaran las mayores deformaciones (concretamente en las pértigas 2 y 3). La pértiga 6 se instaló también muy cerca de una sopanda intermedia y la pértiga 7 en la esquina del voladizo.

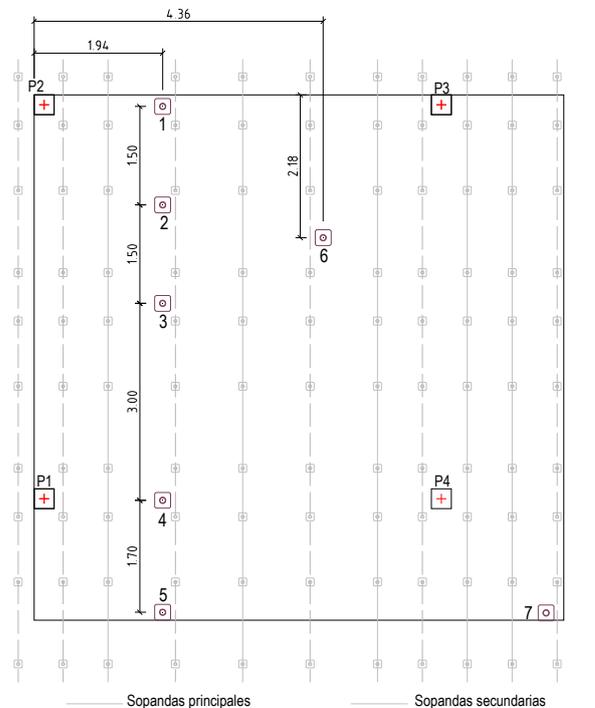


Fig. III.2 Distribución de los LVDTs para los tres forjados

#### III.3.1. Deformaciones del forjado 1

Las pértigas del forjado 1 fueron instaladas una vez se realizó el clareado de éste. Así, los registros de deformaciones del forjado 1 se iniciaron con la operación de hormigonado del forjado 2 y terminaron con la operación de carga en el forjado 3. Las medidas de los LVDTs 1 y 7 fueron descartadas debido a golpes que recibieron las pértigas durante el proceso constructivo. En la Figura III.3 se muestra la evolución de la flecha del forjado 1.

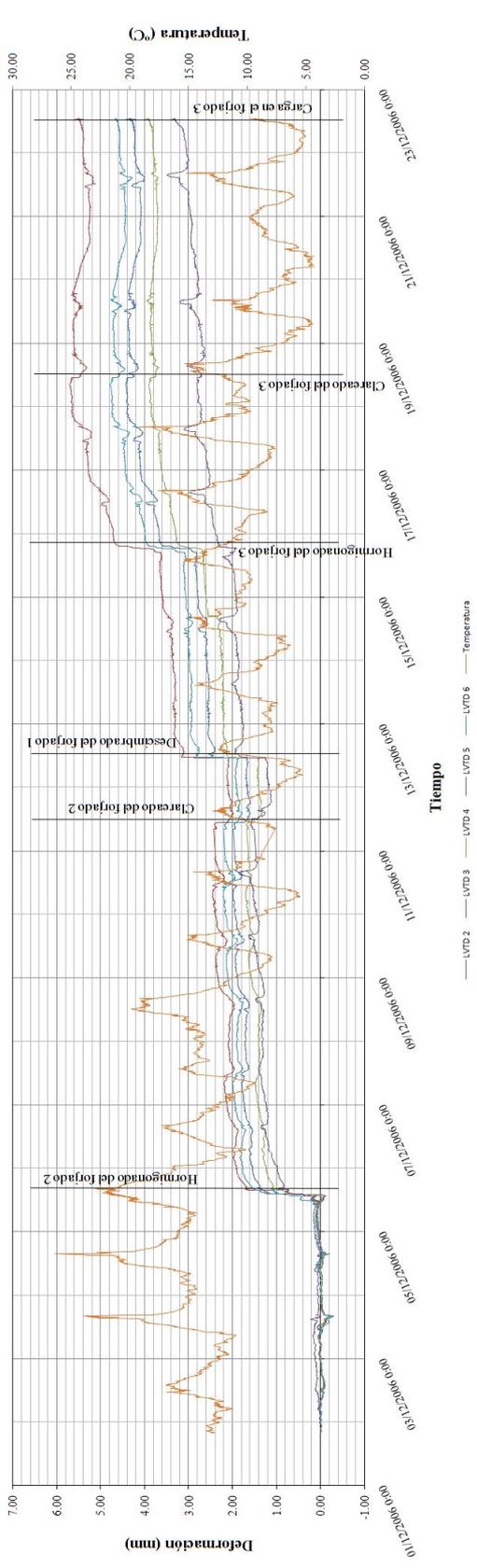


Fig. III.3 Deformaciones en el forjado 1

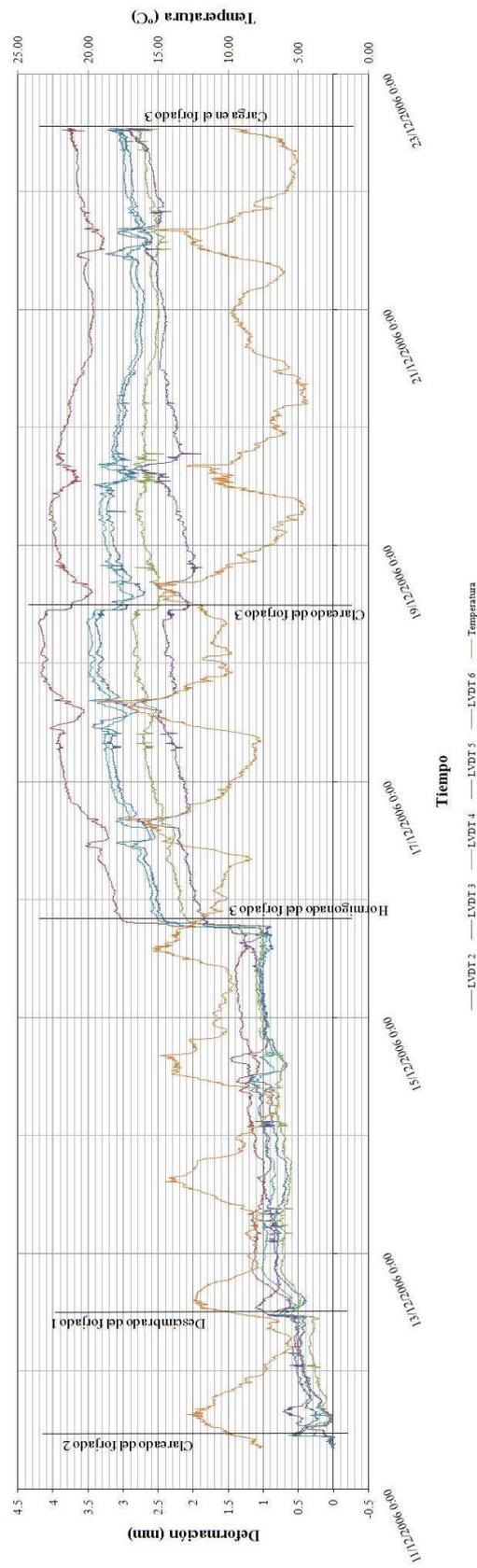


Fig. III.4 Deformaciones en el forjado 2

Las máximas deformaciones registradas en los LVDTs del forjado 1 se presentaron en el LVDT 3. La máxima flecha registrada se presentó al hormigonar el forjado 3. En la Figura III.1 se observa la variación de la flecha en función de los cambios de temperatura ambiente. La pauta de comportamiento de dicha variación, se corresponde a un aumento en la flecha del forjado al descender la temperatura, y a una disminución de la flecha al aumentar la temperatura en las posiciones de los LVDTs 2, 3, 4 y 6. Este comportamiento resulta ser inverso para la posición del LVDT 5 debido a que se encuentra en el borde del voladizo.

### **III.3.2. Deformaciones del forjado 2**

Las pértigas bajo el forjado 2 se instalaron antes del clareado de dicho forjado. Para la instalación de dichas pértigas fue necesario perforar los tableros de encofrado, asegurando el contacto entre la pértiga y el hormigón (véase Fig. III.5). Al igual que en el forjado 1, las medidas tomadas por las pértigas 1 y 7 han tenido que ser descartadas.



Fig. III.5 Tablero de encofrado perforado para montaje de pértiga

Las máximas deformaciones registradas en los LVDTs del forjado 2 se presentaron en el LVDT 3. La flecha máxima registrada se presentó al hormigonar el forjado 3. Al realizar la operación de clareado, la flecha máxima se presentó en los LVDTs 3 y 6 alcanzado un valor de 0.64 mm. Las flechas del forjado 2, también presentan la misma pauta de comportamiento que las flechas del forjado 1, de aumentar al descender la temperatura y de disminuir al aumentar la temperatura en las posiciones de los LVDTs 2, 3, 4 y 6, y el comportamiento inverso para la posición del LVDT 5.

### **III.4. Comentarios**

Las lecturas recogidas por los diferentes LVDTs resultan consecuentes a cada una de las operaciones constructivas realizadas sobre el forjado analizado. Esto quiere decir, que en la operación de hormigonado de un forjado superior se incrementa la flecha del forjado, que al clarear un forjado superior hay una disminución en la flecha del forjado y en la operación de descimbrado se incrementa la flecha de este forjado.

En el Capítulo 4 de la presente Tesis Doctoral, se determinó, a partir del estudio experimental, que las cargas en los puntales presentan variaciones significativas dependiendo de la variación de la temperatura ambiente. La pauta de comportamiento de dicha variación, se corresponde con un

aumento de carga en los puntales al descender la temperatura, y un descenso de carga en los puntales al aumentar la temperatura. Este comportamiento resulta reforzado con las medidas de deformación de los LVDTs instalados bajo los forjados 1 y 2. Las medidas de los LVDTs registran que frente a los aumentos de temperatura el forjado disminuye su flecha y frente a los descensos de temperatura el forjado aumenta su flecha. Es decir, que al aumentar la temperatura el forjado recupera deformación descargando de esta forma los puntales, y al descender la temperatura el forjado aumenta su deformación cargando más a los puntales.



## APÉNDICE IV. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DEL HORMIGÓN DE LOS FORJADOS

### IV.1. Introducción

En la fase experimental, además de las medidas de deformación de los puntales y las medidas de temperatura y deformación de los forjados, se realizaron ensayos de laboratorio al hormigón de cada uno de los forjados con el fin de controlar la evolución de sus propiedades con el tiempo. Los ensayos realizados consistieron en el control de las resistencias a compresión, tracción, flexotracción y del módulo de elasticidad de probetas curadas en las mismas condiciones de curado que los forjados.

En el presente apéndice se muestran los resultados de los ensayos del hormigón de cada uno de los forjados.

### IV.2. Plan de ensayos

El plan de ensayos de laboratorio consistió en evaluar la evolución de las propiedades del hormigón en intervalos de 1, 3, 7 y 28 días después del hormigonado de cada uno de los forjados y de la losa de cimentación. Los ensayos realizados consistieron en el control de las resistencias a compresión (según AENOR 2003), tracción indirecta (según AENOR 2001), flexotracción (según AENOR 2001) y el módulo de elasticidad (según AENOR 1996). El plan de ensayos para los diferentes elementos de la estructura fue el siguiente:

- ✓ Plan de ensayos de laboratorio losa de cimentación:

Tabla IV.1 Plan de ensayos de laboratorio losa de cimentación

Ensayos	Día	Probetas	Total Probetas	Descripción
Compresión simple	1	3	12	24 Probetas cilíndricas de 30 cm.
	3	3		
	7	3		
	28	3		
Tracción indirecta	1	3	12	
	3	3		
	7	3		
	28	3		

- ✓ Plan de ensayos de laboratorio primer forjado:

Tabla IV.2 Plan de ensayos de laboratorio del primer forjado

Ensayos	Día	Probetas	Total Probetas	Descripción	
Compresión simple	1	3	12	36 Probetas cilíndricas de 30 cm.	
	3	3			
	7	3			
	28	3			
Tracción indirecta	1	3	12		
	3	3			
	7	3			
	28	3			
Módulo de elasticidad	1	3	12		
	3	3			
	7	3			
	28	3			
Flexotracción	1	3	12		12 Probetas prismáticas de 10x10 cm. y >35 cm. de largo
	3	3			
	7	3			
	28	3			

✓ Plan de ensayos de laboratorio segundo forjado:

Tabla IV.3 Plan de ensayos de laboratorio del segundo forjado

Ensayos	Día	Probetas	Total Probetas	Descripción
Compresión simple	1	3	12	24 Probetas cilíndricas de 30 cm.
	3	3		
	7	3		
	28	3		
Tracción indirecta	1	3	12	
	3	3		
	7	3		
	28	3		

✓ Plan de ensayos de laboratorio tercer forjado:

Tabla IV.4 Plan de ensayos de laboratorio del tercer forjado

Ensayos	Día	Probetas	Total Probetas	Descripción
Compresión simple	1	3	12	24 Probetas cilíndricas de 30 cm.
	3	3		
	7	3		
	28	3		
Tracción indirecta	1	3	12	
	3	3		
	7	3		
	28	3		

### IV.3. Resultados de los ensayos

#### IV.3.1. Resultados de los ensayos del hormigón de la losa de cimentación

El hormigonado de la losa de cimentación se realizó el 16 de Noviembre de 2006. En el hormigón de la losa de cimentación se realizaron ensayos de compresión y tracción indirecta para edades de 1, 3, 7, y 28 días. Los resultados de los ensayos se muestran en la Tabla IV.5.

Tabla IV.5 Resultados de los ensayos del hormigón de la losa de cimentación

Ensayos	Día	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Compresión simple (MPa)	1	8.47	8.99	7.95	8.47
	3	19.77	19.56	18.98	19.44
	7	26.54	25.10	25.28	25.64
	28	30.05	30.96	29.15	30.05
Tracción indirecta (MPa)	1	0.90	1.12	1.05	1.02
	3	1.96	1.88	1.58	1.81
	7	2.85	2.79	2.74	2.79
	28	3.15	3.17	3.09	3.14

#### IV.3.2. Resultados de los ensayos del hormigón del forjado 1

El hormigonado del forjado 1 se hizo el 28 de Noviembre de 2006. En el hormigón de dicho forjado se hicieron ensayos de compresión, tracción indirecta, flexotracción y módulo de elasticidad para edades de 1, 3, 7 y 28 días. Los resultados de los ensayos se muestran en la Tabla IV.6.

Tabla IV.6 Resultados de los ensayos del hormigón del forjado 1

Ensayos	Día	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Compresión simple (MPa)	1	9.70	10.50	9.40	9.87
	3	19.70	21.40	19.40	20.17
	7	26.10	23.30	22.20	23.87
	28	35.50	31.60	27.70	31.60
Tracción indirecta (MPa)	1	1.25	1.39	0.83	1.16
	3	1.87	2.01	1.39	1.76
	7	2.29	2.84	2.57	2.57
	28	3.14	3.19	3.19	3.17
Flexotracción (MPa)	1	2.13	2.50	2.06	2.23
	3	4.05	3.97	3.53	3.85
	7	4.41	3.97	4.01	4.13
	28	4.27	4.41	4.41	4.36
Módulo de elasticidad (GPa)	1	21.44	19.48	-	20.46
	3	28.08	27.43	-	27.75
	7	29.54	27.47	-	28.50
	28	34.51	32.79	-	33.65

#### IV.3.3. Resultados de los ensayos del hormigón del forjado 2

El hormigonado del forjado 2 se llevó a cabo el 5 de Diciembre de 2006. En el hormigón del forjado 2 se hicieron ensayos de compresión y tracción indirecta para edades de 1, 3, 7 y 28 días. La Tabla IV.7 muestra los resultados de dichos ensayos.

Tabla IV.7 Resultados de los ensayos del hormigón del forjado 2

Ensayos	Día	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Compresión simple (MPa)	1	7.80	5.50	10.00	7.77
	3	18.30	19.40	20.50	19.40
	7	25.50	22.70	28.30	25.50
	28	33.99	34.05	34.90	34.31
Tracción indirecta (MPa)	1	0.97	1.11	1.39	1.16
	3	2.22	2.22	2.50	2.31
	7	2.50	2.91	2.91	2.77
	28	2.98	3.19	3.19	3.08

#### **IV.3.4. Resultados de los ensayos del hormigón del forjado 3**

El hormigonado del forjado 3 se hizo el 15 de Diciembre de 2006. En el hormigón de dicho forjado se realizaron ensayos de compresión y tracción indirecta para edades de 1, 3, 7 y 28 días. La Tabla IV.8 muestra los resultados de estos ensayos.

Tabla IV.8 Resultados de los ensayos del hormigón del forjado 3

Ensayos	Día	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Compresión simple (MPa)	1	4.40	3.90	5.00	4.43
	3	18.90	20.00	21.10	20.00
	7	28.30	26.60	25.00	26.63
	28	38.80	34.90	34.90	36.20
Tracción indirecta (MPa)	1	0.55	0.55	0.69	0.60
	3	2.64	2.50	2.22	2.45
	7	3.05	-	3.05	3.05
	28	3.47	3.19	3.05	3.24

## APÉNDICE V. ESTIMACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN DE LOS FORJADOS

### V.1. Introducción

El desarrollo del modelo de EF del Capítulo 5 considera que la rigidez de los forjados evoluciona en función del tiempo. Esta particularidad planteó la necesidad de estimar el valor del módulo de elasticidad del hormigón, de cada uno de los forjados, para cada una de las fases constructivas consideradas en el modelo de EF.

La aplicación de la técnica de la madurometría permite estimar la evolución de las propiedades mecánicas del hormigón, en función de su edad. Esta técnica se basa en la medición de la temperatura del hormigón y de su edad, para posteriormente obtener evolución de cualquier parámetro mecánico en tiempo real y para un historial de temperaturas dado.

A partir de los resultados de ensayos de módulo de elasticidad en probetas cilíndricas y de los registros de tiempo y temperatura de cada uno de los forjados, en el presente Apéndice se justifican los valores del módulo de elasticidad considerados para los elementos de hormigón integrados en el modelo numérico.

### V.2. Datos de partida

El primer dato de partida son los resultados de los ensayos de módulo de elasticidad en probetas cilíndricas normalizadas de 30x15 cm, fabricadas con el hormigón del forjado 1. Estas probetas fueron curadas en idénticas condiciones de obra que el forjado 1, y su temperatura se registró embebiendo un termopar en el hormigón de la probeta. Las probetas fueron ensayadas a 1, 3, 7 y 28 días. La Tabla V.1 muestra los resultados de los ensayos de las probetas.

Tabla V.1 Resultados de los ensayos de módulo de elasticidad

Tiempo (Días)	Módulo de deformación (GPa) Probeta 1	Módulo de deformación (GPa) Probeta 2	Módulo de deformación (GPa) Promedio
1	21.44	19.48	20.46
3	28.08	27.43	27.75
7	29.54	27.47	28.50
28	34.51	32.79	33.65

Por otro lado, es necesario conocer la evolución de temperaturas y tiempo (medido desde el hormigonado) en las probetas y en los forjados de hormigón. En las Figuras V.1, V.2 y V.3 se muestra la evolución de la temperatura de los forjados 1, 2 y 3, respectivamente.

Estudio de la construcción de forjados hormigonados in situ empleando el clareado

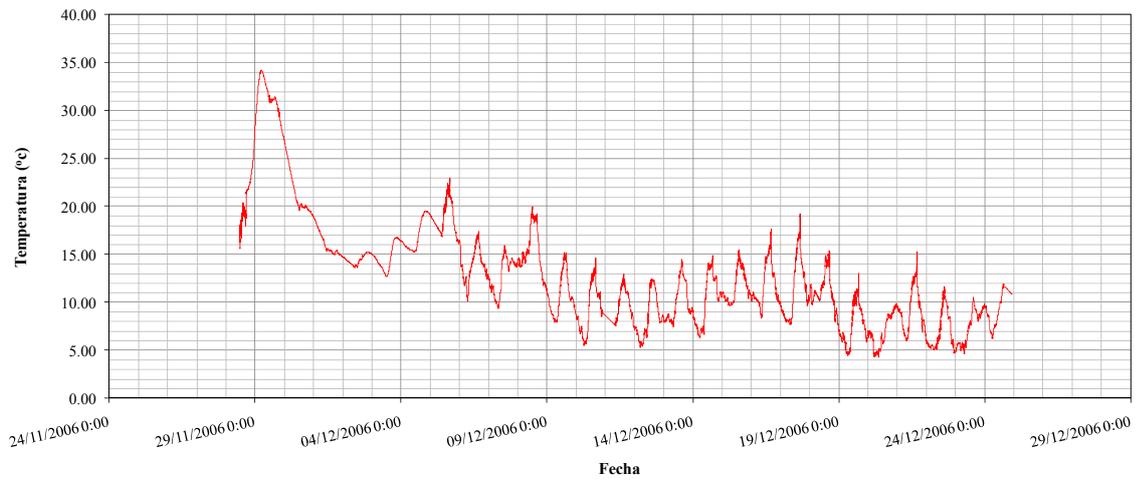


Fig. V.1 Temperaturas registradas en el hormigón del forjado 1

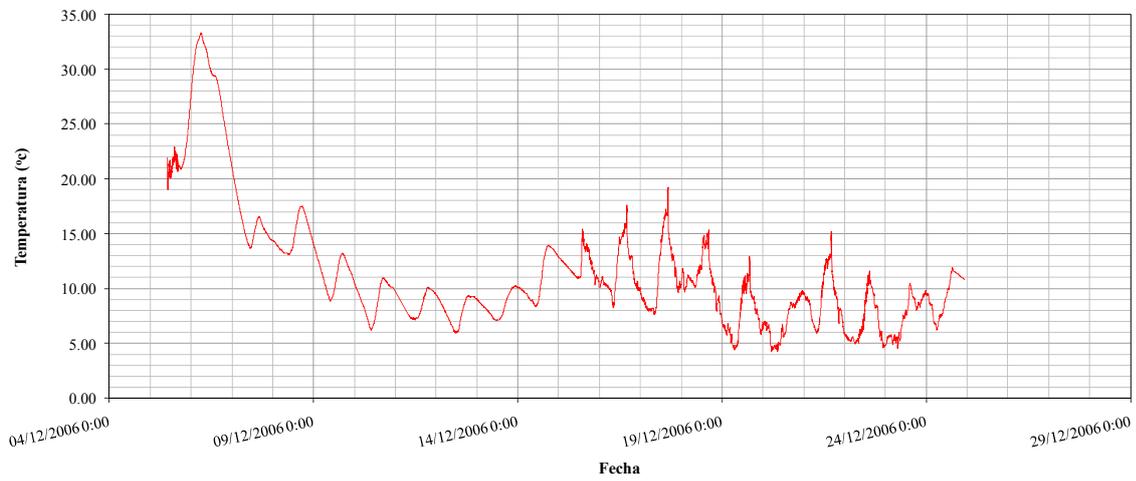


Fig. V.2 Temperaturas registradas en el hormigón del forjado 2

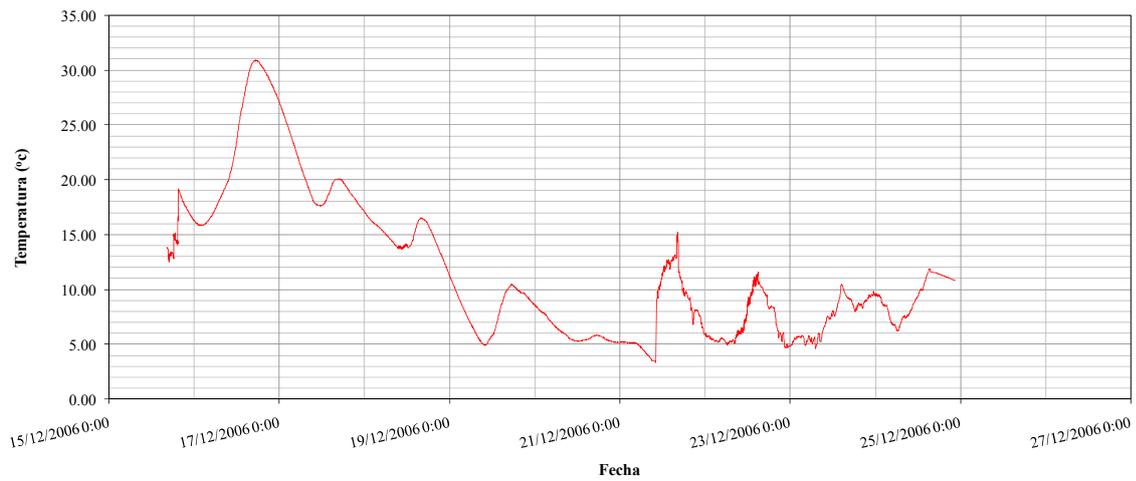


Fig. V.3 Temperaturas registradas en el hormigón del forjado 3

En la Tabla V.2 se observa la evolución media diaria de temperaturas en las probetas de hormigón del forjado 1 y del hormigón de los 3 forjados para los siete días posteriores a su hormigonado.

Tabla V.2 Evolución de la temperatura del hormigón de las probetas del forjado 1 y de los forjados del modelo experimental

Tiempo (Días)	Temperatura promedio (°C) Probeta F+01	Temperatura promedio (°C) F+01	Temperatura promedio (°C) F+02	Temperatura promedio (°C) F+03
1	15.76	29.37	27.21	17.40
2	12.28	26.04	22.91	25.53
3	13.08	16.59	14.53	16.23
4	14.62	14.63	13.91	13.39
5	12.70	14.29	12.10	7.92
6	15.55	16.20	9.22	5.15
7	15.42	18.53	7.88	7.04
8		20.33	7.44	7.46
9		13.06	8.99	-
10		14.37	12.10	-
11		12.94	12.15	-
12		9.76	11.85	-
13		10.87	12.20	-
14		9.03	11.26	-
15		8.93	7.48	-
16		9.80	7.02	-
17		11.36	6.98	-
18	12.42	12.65	7.52	-
19		11.09	-	-
20		12.01	-	-
21		10.97	-	-
22		7.52	-	-
23		7.84	-	-
24		7.14	-	-
25		8.55	-	-
26		-	-	-
27		-	-	-
28		-	-	-

### V.3. Aplicación de la madurometría

La estimación del módulo de elasticidad del hormigón de los forjados del modelo experimental se realizó empleando la técnica de la madurometría. Esta técnica permite mediante la medida de la temperatura del hormigón y el tiempo (medido desde el hormigonado), evaluar la evolución de cualquier parámetro mecánico en tiempo real y para una temperatura dada (véase p.e. Perepérez y Barberá 2004).

Aprovechando que el hormigón de los tres forjados tiene la misma dosificación, la estimación del módulo de elasticidad se basa en la evolución de dicho módulo en las probetas de hormigón del forjado 1, y en el registro de tiempo y temperatura de los tres forjados durante el proceso constructivo.

En el siguiente apartado se describe brevemente el método de la madurez, justificando los valores del módulo de elasticidad empleados en el desarrollo del modelo numérico de la presente Tesis Doctoral.

### V.3.1. El método de la madurez

El método de la madurez ha sido empleado durante más de 20 años para determinar las propiedades mecánicas del hormigón a edades tempranas. Además, a menudo es empleado para determinar la edad que debe tener el hormigón para poder desencofrar una estructura de hormigón. Ejemplos del empleo del método de la madurez se pueden encontrar en Waller et al. (2004) y Adam et al. (2007).

El concepto de la madurez define el estado que ha alcanzado el hormigón en el proceso de hidratación del cemento. Por lo tanto, se puede decir que la madurez representa el grado de desarrollo alcanzado por una determinada propiedad de una mezcla de base de cemento, y depende de la historia de temperaturas a lo largo del proceso de curado (ASTM C 1074-98 1999).

La madurez se basa en el principio de tiempo equivalente, considerando una energía de activación aparente del material, para estimar la evolución de las propiedades del hormigón puesto en obra.

El tiempo equivalente o edad teórica se puede definir como el número  $j$  de días (o de horas) necesario, a una temperatura de referencia  $T_R$ , para que la madurez de la mezcla se iguale a la alcanzada con temperaturas distintas a la de referencia, aplicadas durante un periodo de tiempo  $t$  (ASTM, 1999). Con base en la ley de Arrhenius (Ec. V.1) (Guo 1989) (Laplante 1994), P. Freiesleben Hansen y E.J. Pedersen en 1977 propusieron la Ec. V.2 de tiempo equivalente (CEB 1992).

$$k = A \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot T}} \quad (V.1)$$

Donde,  $k$  es la constante de velocidad (1/s para una reacción de primer orden,  $A$  la constante denominada factor de frecuencia (1/s para un reacción de primer orden),  $E$  la energía de activación (independiente de la temperatura),  $T$  la temperatura en grados kelvin y  $R$  la constante de los gases perfectos (8.3144 J/°K mol).

$$j = \sum_{i=0}^{i=t} \left( e^{\frac{E}{R} \left( \frac{1}{273+T_R} - \frac{1}{273+T_i} \right)} \cdot \Delta t_i \right) \quad (V.2)$$

Siendo,  $j$  el tiempo equivalente en días,  $E$  la energía de activación aparente (J/mol),  $T_R$  la temperatura de referencia y  $T_i$  la temperatura en el intervalo de tiempo  $\Delta t_i$  en grados centígrados.

Habitualmente se suele utilizar un valor único para la energía de activación aparente. Según propuesta del Código Modelo CEB-FIP 1990 (CEB-FIP 1993), coincidente con la del anejo B de la propuesta de modificación del Eurocódigo 2, se puede considerar para el hormigón una energía aparente de activación constante e igual a 33258 J/mol y una temperatura de referencia de 20°C. De esta forma el tiempo equivalente se puede expresar como muestra la Ec. V.3.

$$j = \sum_{i=0}^{i=t} \left( e^{\left( 13.65 \cdot \frac{4000}{273+T_i} \right)} \cdot \Delta t_i \right) \quad (V.3)$$

El campo de aplicación de este modelo se extiende entre las temperaturas de 0 °C y 60°C y con cementos con contenidos casi nulos o relativamente reducidos de adiciones (tipos CEM I y CEM II) (fib 1999).

### V.3.2. Estimación del módulo de elasticidad

La Figura V.4 muestra la línea de tendencia para los resultados del módulo de elasticidad de las probetas de hormigón. Cada uno de los valores de módulo de elasticidad se corresponde a un tiempo y A una temperatura del hormigón de la probeta.

Empleando la ecuación V.3 se determina el tiempo equivalente para una temperatura de referencia de 20°C del hormigón de la probeta de hormigón. Así, se determina la función y línea de tendencia que relaciona la evolución del módulo de elasticidad con el tiempo equivalente para una temperatura de referencia de 20°C. La Tabla V.3 muestra el tiempo equivalente para la probeta de hormigón. La Figura V.5 muestra la línea de tendencia para la evolución del módulo de elasticidad para una temperatura de referencia de 20°C.

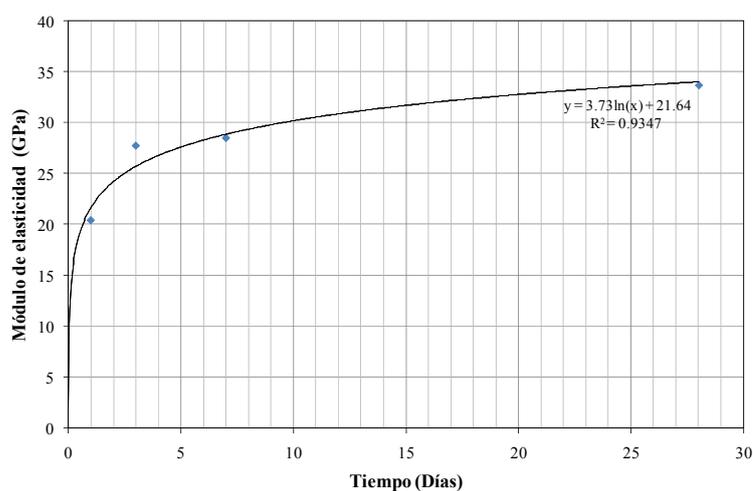


Fig. V.4 Evolución del módulo de elasticidad de la probeta de hormigón

Tabla V.3 Tiempo equivalente probeta de hormigón

Tiempo (Días)	Temperatura (°C)	Tiempo Equivalente (Días)	Módulo de deformación (GPa) Promedio
1	15.77	0.82	20.46
2	12.28	1.51	24.23
3	13.08	2.22	27.75
4	14.62	3.00	25.74
5	12.70	3.70	26.82
6	15.55	4.51	27.65
7	15.42	5.31	28.50
28	12.05	27.00	33.65

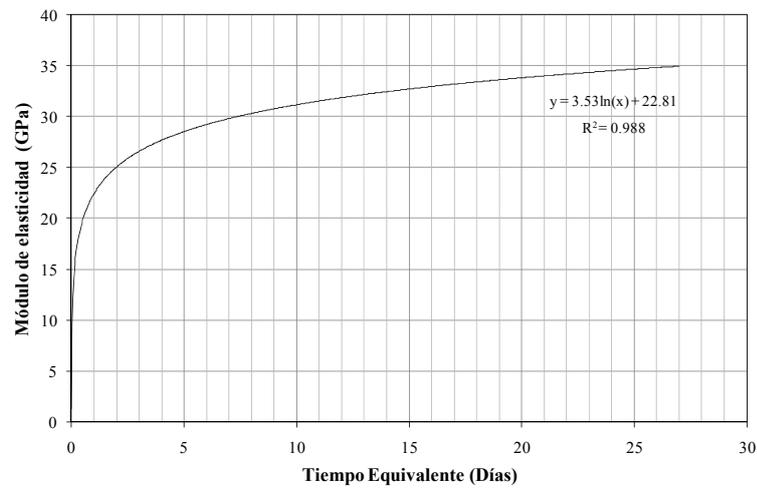


Fig. V.5 Evolución del módulo de elasticidad para el tiempo equivalente temperatura de referencia 20°C

Tabla V.4 Tiempo equivalente para el hormigón de cada uno de los forjados

Tiempo (Días)	Temperatura promedio (°C) F+01	Tiempo Equivalente F+01 (Días)	Temperatura promedio (°C) F+02	Tiempo Equivalente F+02 (Días)	Temperatura promedio (°C) F+03	Tiempo Equivalente F+03 (Días)
1	29.37	1.52	27.21	1.39	17.40	0.88
2	26.04	2.84	22.91	2.53	25.53	2.17
3	16.59	3.69	14.53	3.30	16.23	3.00
4	14.63	4.46	13.91	4.04	13.39	3.73
5	14.29	5.22	12.10	4.77	7.92	4.29
6	16.20	6.06	9.22	5.32	5.15	4.77
7	18.53	6.99	7.88	5.87	7.04	5.30
8	20.33	8.00	7.44	6.42	7.46	5.84
9	13.06	8.72	8.99	7.00	-	-
10	14.37	9.48	12.10	7.69	-	-
11	12.94	10.20	12.15	8.37	-	-
12	9.76	10.80	11.85	9.05	-	-
13	10.87	11.45	12.20	9.73	-	-
14	9.03	12.03	11.26	10.39	-	-
15	8.93	12.62	7.48	10.93	-	-
16	9.80	13.23	7.02	11.46	-	-
17	11.36	13.89	6.98	11.99	-	-
18	12.65	14.59	7.52	12.53	-	-
19	11.09	15.24	-	-	-	-
20	12.01	15.92	-	-	-	-
21	10.97	16.57	-	-	-	-
22	7.52	17.11	-	-	-	-
23	7.84	17.67	-	-	-	-
24	7.14	18.20	-	-	-	-
25	8.55	18.77	-	-	-	-
26	-	-	-	-	-	-
27	-	-	-	-	-	-
28	-	-	-	-	-	-

Así, la ecuación que representa la evolución del módulo de elasticidad del hormigón es:

$$E_t = 3.53 \cdot \ln(j) + 22.81 \quad (V.4)$$

Donde,  $E_t$  es el módulo de elasticidad para una edad de  $t$  días (GPa) y  $j$  es el tiempo equivalente para una edad de  $t$  días.

Entonces, para determinar la evolución del módulo de elasticidad del hormigón de los forjados, se hace necesario, determinar el tiempo equivalente para una temperatura de referencia de 20°C. En la Tabla I.4, a partir de la ecuación V.3, se muestran los valores del tiempo equivalente para el hormigón de cada uno de los forjados.

Obtenido el tiempo equivalente para el hormigón de cada uno de los forjados, y empleando la ecuación V.4 se estima la evolución del módulo de elasticidad. Las Figuras V.6, V.7 y V.8 muestran la evolución del módulo de elasticidad del hormigón de los forjados 1, 2 y 3, respectivamente.

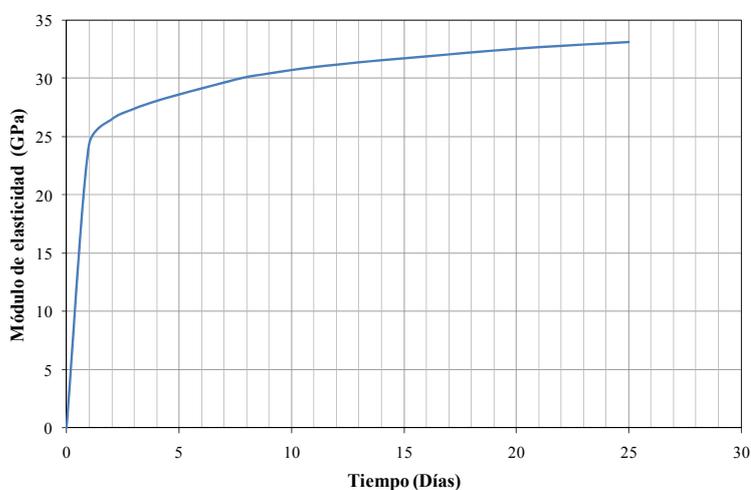


Fig. V.6 Estimación del módulo de elasticidad del forjado 1

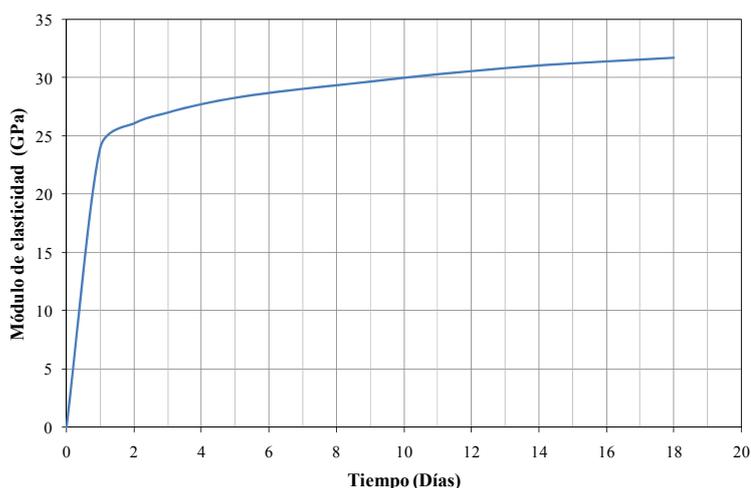


Fig. V.7 Estimación del módulo de elasticidad del forjado 2

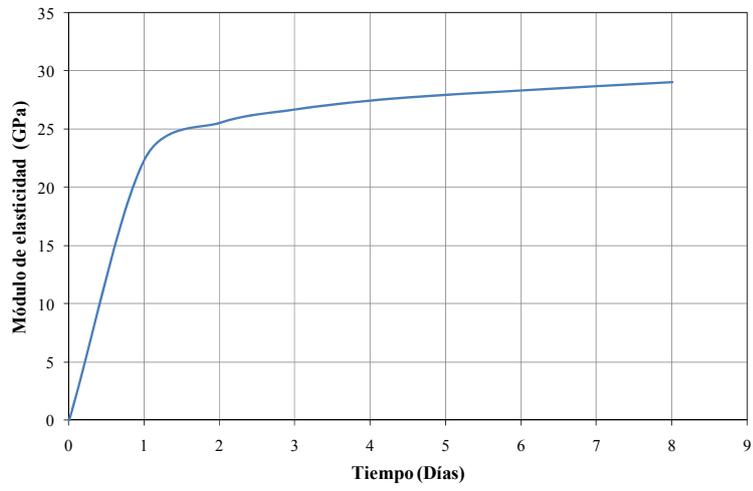


Fig. V.8 Estimación del módulo de elasticidad del forjado 3

